

# Otkrivanje kvarova rotora kaveznoga asinkronoga motora analizom magnetskoga polja u zračnom rasporu

---

Tvorić, Stjepan

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:168:643924>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-20**



*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Stjepan Tvorić

**OTKRIVANJE KVAROVA ROTORA KAVEZNOGA  
ASINKRONOGA MOTORA ANALIZOM  
MAGNETSKOGA POLJA U ZRAČNOM RASPORU**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Stjepan Tvorić

**OTKRIVANJE KVAROVA ROTORA KAVEZNOGA  
ASINKRONOGA MOTORA ANALIZOM  
MAGNETSKOGA POLJA U ZRAČNOM RASPORU**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Željko Štih

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Car

Zagreb, 2019.



University of Zagreb  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Stjepan Tvorčić

**ROTOR FAULTS DETECTION IN SQUIRREL-CAGE  
INDUCTION MOTOR BASED ON MAGNETIC FIELD  
ANALYSIS IN AIR-GAP**

DOCTORAL THESIS

Supervisors:

Professor Željko Štih, PhD

Associate Professor Stjepan Car, 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

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Car

Disertacija ima: 203 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 Ph.D. 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**

**Stjepan Car** rođen je 1949 u Zagrebu, Hrvatska. Studij elektrotehnike završio je u Zagrebu 1972. godine, a 1979. godine stekao akademsko zvanje doktora tehničkih znanosti iz područja elektrotehnike. Nakon diplomiranja zaposlio se u Institutu KONČAR-a gdje je 18 godina radio na istraživačkim i razvojnim zadacima iz područja rotacijskih strojeva i elektromotornih pogona, 8 godina bio je član Uprave KONČAR – Elektroindustrija d.d. odgovoran za područje korporativnog razvoja i poslovno područje industrije, a 15 godina je obnašao dužnost predsjednika Uprave društva KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d. Objavio je preko 80 znanstvenih i stručnih članaka te referata, koautor 3 patenta i autor monografije objavljene 2011. povodom obilježavanja pedesete obljetnice osnivanja ustanove Elektrotehnički institut RADE KONČAR i dvadesete obljetnice osnivanja trgovačkog društva KONČAR – Instituta za elektrotehniku, d.d.: "50 godina primijenjenih znanstvenih istraživanja i razvoja na području elektrotehnike".

Niz godina honorarno je predavao predmet Električni strojevi na veleučilištima u Zagrebu, Varaždinu i Rijeci, a od 2006. do 2017. je predavao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu predmet Menadžment u inženjerstvu. Sudjelovao je na mnogobrojnim raspravama i održao preko 40 pozvanih predavanja. Dobitnik je Godišnje nagrade za 2007. godinu koju mu je dodijelila Hrvatska zajednica tehničke kulture, a 2012. primio je Državnu nagradu tehničke kulture za životno djelo „Faust Vrančić“ za trajan doprinos i ukupnu djelatnost u razvoju tehničke kulture. Primio je 2013. Godišnju nagradu „Hrvoje Požar“ za stručni i znanstveni doprinos razvitku energetike, a Predsjednik Republike odlikovao ga je Ordenom Danice Hrvatske s likom Nikole Tesle. Umirovljen je 2014., ali je i dalje aktivan u promicanju inovacija i primjeni novih materijala i tehnologija, osobito razvoja kružne ekonomije i niskouglijčne strategije. Također je aktivan i dalje u KONČAR – Institutu za elektrotehniku kao specijalist i savjetnik za električne strojeve i elektromotorne pogone, a kao član Zelene energetske zadruge iz Zagreba aktivno sudjeluje na projektima primjene obnovljivih izvora energije, energetske učinkovitosti i niskouglijčne strategije u elektroindustriji.

## **About the Supervisor**

**Stjepan Car** was born in Zagreb, Croatia, in 1949. After graduating from the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb in 1972 he spent most of his career at KONČAR – Electrical Engineering Institute Inc. His professional interest and specialization are R&D of rotation machines. In the same field, he received his Ph.D. in 1979. He had been a member of the Managing Board of KONČAR Group in charge of corporate development for

8 years and had been the president of the Managing Board of KONČAR – Electrical Engineering Institute, Inc for 15 years. He published more than 80 scientific and technical articles, he is a co-author of 3 patents and the author of a monography: 50 Years of Applied Research and Development in Electrical Engineering.

For many of years, he had been teaching the Electrical machines subject at the higher education institutions in Zagreb, Varaždin, and Rijeka. From 2006 to 2017, he has been teaching Management in Engineering at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb. He lectured at that time more than 40 invited lectures. He was granted Faust Vrančić National Award for Technical Culture for lifetime achievement and the prestigious Order of the Croatian Danica with the image of Nikola Tesla. He retired in 2014 but is still very active in promoting innovation and application of new materials and technologies. In particular, he favours circular and low carbon economy, as well as smart specialization needed for the global market success.

He is active at KONČAR – Electrical Engineering Institute, Inc. As a specialist for electrical machines and variable speed drive systems. Furthermore, he is very active as a member at Green Energy Cooperative, Zagreb, working on renewable energy projects, energy efficiency projects and low-carbon strategies in the electrical industry.

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Štihu, s kojim surađujem još od vremena svojih studentskih dana. Vaši konkretni stručni savjeti uvijek su mi bili velika pomoć u radu. Hvala na korisnim savjetima i razumijevanju.*

*Zahvaljujem se komentoru izv. prof. dr. sc. Stjepanu Caru, na korisnim savjetima i razumijevanju tijekom izrade disertacije, ali i na stručnim savjetima kroz dosadašnji radni staž proveden u tvrtki KONČAR - Institut za elektrotehniku d.d., stoga Vam jedno veliko hvala na svemu, a posebno na ukazanoj povjerenju.*

*Zahvaljujem se dr.sc. Anti Elezu čiji su stručni, znanstveni i kolegijalni savjeti bili od velike pomoći i koristi tijekom znanstvenih istraživanja. Također, hvala i svim kolegama iz tvrtke KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d. i Zavoda za rotacijske strojeve, a posebno ing. Milanu Kovačeviću s kojim je bilo posebno zadovoljstvo surađivati tijekom laboratorijskih mjerenja te kolegama Petru Korenu i Vedranu Jančiću, čiji su savjeti bili korisni kod izrade kôda algoritma.*

*Jedno veliko hvala mojoj obitelji: ocu Slavku, majci Bernardi i sestri Alojziji. Hvala vam na podršci i vjerovanju u mene jer bez vas ne bi bilo ove disertacije kao ni svih drugih uspjeha.*

*"Ne opstaju najjači u vrsti ili najinteligentniji. Već oni koji se najbolje prilagođavaju promjenama."*

*In memoriam baki Dragici*

## Sažetak

Danas se, od električnih strojeva koji svoju ulogu ispunjavaju samostalno ili kao dio složenog procesa, očekuje visok stupanj pouzdanosti i raspoloživosti, stoga je otkrivanje nastanka i uzroka kvara s ciljem sprečavanja većih štetnih posljedica za tehnološki proces od iznimne važnosti. Niz metoda i postupaka razvijeno je u svrhu otkrivanja i sprečavanja kvarova koji s više ili manje osjetljivosti detektiraju pojedinu vrstu kvara stroja. U ovom radu naglasak je stavljen na točno otkrivanje i prepoznavanje kvarova rotora kaveznoga asinkronog motora. Prikazana je raspodjela kvarova prema glavnim komponentama motora, uzroci i priroda nastajanja kvara te različite metode detekcije pojedine vrste kvara asinkronog motora.

U ovom radu odabrana je metodologija otkrivanja kvarova rotora kaveznog motora analizom magnetskog polja u zračnom rasporu. Ona se temelji na naponima koji se induciraju u mjernim svicima ugrađenima na zub statora i koji su međusobno razmaknuti za polni korak stroja  $\tau_p$ . Korištenjem ove metodologije u kombinaciji s metodom oduzimanja induciranih napona analizirani su kvarovi rotora: prekid jednog ili više štapova rotora, prekid prstena te pojava statičkog ekscentriciteta. Za analizu navedenih kvarova, prvo je izrađen numerički 2D model motora temeljen na metodi konačnih elemenata (MKE) s ciljem provjere predložene metodologije za otkrivanje kvarova. Proračunima je dokazano da je pomoću napona koji se induciraju u mjernim svicima moguće, s visokom razinom osjetljivosti, otkriti i prepoznati pojedini kvar rotora. Dokazano je proračunima da svaki kvar rotora ima svoju prirodu ponašanja, tj. svojstvenu karakteristiku koja se manifestira u razlici induciranih napona dvaju mjernih svitaka ili u samom induciranom naponu pojedinog mjernog svitka. Rezultati dobiveni MKE proračunima verificirani su mjerenjima u laboratoriju na asinkronom motoru namijenjenom za pogon tramvaja. Navedeni motor je posebno doraden kako bi se njime moglo simulirati kvarove kaveznog rotora.

Mjerenjem su potvrđeni rezultati numeričkih proračuna te je postignuto vrlo dobro slaganje istih, a dokazano je i da pojava pojedinog kvara rotora ima specifičan utjecaj na inducirani napon u mjernom svitku koji je posljedica promjena magnetskog toka i prostorno je razmaknut za polni korak od prvog sljedećeg svitka. Analizom rezultata također je određen i optimalan raspored te broj potrebnih mjernih svitaka za otkrivanje kvarova rotora. Budući da su inducirani naponi osjetljivi na pojavu kvara, temeljem toga razvijen je algoritam koji otkriva i prepoznaje pojedinu vrstu kvara rotora. Algoritam na osnovu ulaznih podataka, a to su vrijednosti induciranog napona u četiri mjerna svitka prostorno razmještena za  $\tau_p$  i dobivena za jedan puni okret rotora, pouzdano otkriva prekid štapa i prstena te statički ekscentricitet. Osim pouzdanog otkrivanja kvara u kombinaciji s korištenjem metode

oduzimanja induciranih napona, moguće je i raspoznati pojedini kvar rotora. Princip korištenja mjernih svitaka ugrađenih u zračni raspor u otkrivanju kvarova kaveznog rotora pokazao se je primjenjiv te ga je moguće koristiti kao dio ekspertnog sustava za nadzor i praćenje stanja asinkronog motora.

**Ključne riječi:** asinkroni motor, kavezni rotor, prekid štapa, prekid prstena, statički ekscentricitet, mjerni svitak, inducirani napon, magnetska indukcija, polni korak, algoritam

# **Rotor Faults Detection in Squirrel-Cage Induction Motor based on Magnetic Field Analysis in Air-Gap**

## **Introduction**

The electric rotating machines are part of a various process in the production and conversion of electrical energy, playing an important role independently or as a part of a complex process. Induction motors are one of the most common types of electrical machines, and they play a key role in various industrial plants such as power plants, oil refineries, chemical plants, metal foundries, pumping stations, coal mills, and paper mills. Because of the importance in the process, these machines must achieve reliable and safe operation. To ensure this, all key machines contain some types of protection, supervision, and monitoring. The main goal is an early machine fault detection and the possibility to recognize the type and nature of a fault. The cause of induction machines faults lies in electrical and mechanical conditions together with operational environment. According to the literature, the most common faults of induction machines are bearing faults, following stator and rotor faults and other faults such as different types of eccentricity (static, dynamic or both). In order to early detect and recognize induction machine fault, various types of fault detection methods have been developed. These methods are a result of long-term testing, measurement, and monitoring of the induction machine operation. As a part of this dissertation, a method based on the magnetic field measurement in the air gap using the measuring coils embedded in the machine is presented. This methodology is used for reliable and unambiguous detection of squirrel-cage rotor faults: broken rotor bar, broken rotor ring, and static eccentricity. Numerous studies have shown that by magnetic field measurement inside and outside of the machine, it is possible to detect faults such as inter-turn short circuit, broken rotor bar, broken rotor ring, and eccentricity. Therefore, an approach based on the magnetic field analysis in the air gap has been selected. Within this dissertation, the issues regarding the induction motor fault detection are discussed, especially the faults associated with the rotor. The aim of the thesis is a contribution to the early and reliable fault detection of electrical rotating machines based on the magnetic field analysis in the air gap. Also, one of the main goals is that the new findings on the fault detection based on the air gap magnetic field analysis is its implementation 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.

## **State of the art and fault detection methods**

This chapter describes the induction motor faults and reviews existing methods for motor fault detection. The need for supervisory of the critical machines using monitoring systems and the benefits provided by such systems are also shown. The research and literature show the distribution of motor faults based on the main machine parts: stator faults, rotor faults, bearing faults and other faults. Bearing faults are the most common types of induction motor faults and their occurrence varies in the range of 40 % to 50 % of the total number of faults. The causes of these faults are mainly mechanical, but also can be of electrical nature. Depending on the survey, the stator faults occurrence on the induction motor varies in the range from 30 % to 40 % of the total number of faults. These faults are mainly due to the damage caused by the winding insulation system. In general, insulation damage is caused by thermal, electrical and mechanical stresses and environmental conditions. The 10 % of all induction motor faults are related to the rotor. Based on the squirrel-cage construction of the rotor, the faults that occur are broken rotor bar(s) and broken rotor ring. From the study, 12 % of the total number of faults on the squirrel-cage induction motors refers to other types of faults. Mostly it is about the occurrence of some type of rotor eccentricity. The machine's eccentricity occurs when the rotor circumference is not uniformly spaced from the stator bore, i.e. there is an unequal air gap. The appearance of the rotor eccentricity can be described by the position and type of rotation of the rotor relative to the stator. In general, according to the rotor axis axial movement, there are two types of air-gap eccentricity: static and dynamic. In case of the static eccentricity, the position of the minimal radial air-gap length is fixed in space. In case of the dynamic eccentricity, the center of the rotor is not at the center of the rotation and the position of the minimum air-gap rotates with the rotor. In order to early detect motor faults, a wide range of fault detection methods has been developed and discovered. The detection methods are based on the signal's measurement from sensors, which are then processed by appropriate computer algorithms. After processing data, one can perform certain conclusions based on output results. Chronologically, fault detection methods can be grouped as follows: machine visual inspection (the oldest method); physical quantities measurement (electrical, mechanical, thermal, etc.); numerical calculations (FEM method), artificial intelligence (fuzzy logic, neural networks, expert systems). The most widely and commonly used detection method for induction motor faults is motor current signature analysis (MCSA). The method is based on the stator current measurement, whereas the current is analyzed with the corresponding algorithm using Fast Fourier Transform to obtain the frequency spectrum. This spectrum is then analyzed with the aim to detect sideband harmonics around supply

frequency. Based on these harmonics in stator current, it is possible to detect induction motor faults such as broken rotor bar, bearing fault, inter-turn short circuit of the stator winding or static eccentricity. This method has certain limitations because the sideband harmonics depend on the slip frequency. Namely, with motor load changing, the frequency spectrum changes too and therefore, the harmonics amount is also changed. Thus, reliable motor fault detection by current spectral analysis is difficult. Today, in order to improve motor fault detection, the new techniques and methods based on artificial intelligence are increasingly being used. These methods are based on concepts such as fuzzy logic, neural networks, genetic algorithms, and expert systems.

### **Induction motor for experimental measurements and measuring equipment**

This chapter describes induction traction motor on which experimental measurement and FEM calculations were conducted. In order to perform specific laboratory measurements, the analyzed 3-phase induction motor is specially redesigned. The main reason for redesign was to enable simulation of various motor faults. Using the motor, the following faults that were possible to simulate: inter-turn short circuit of the stator winding, broken rotor bar(s), broken rotor ring, static eccentricity and bearing damages. During the measurements, methods and technical solutions used in the rotating machines monitoring have been applied. Also, equipment that is commonly used in testing and diagnosis of electric rotating machines have been applied. The measurement system applied during the experimental work consists of analyzed object (induction motor), measuring sensors (measuring coils and inductive distance sensors), measuring laboratory unit, measured data transfer to computer, processing, and analysis of measured quantities. The sensors applied to detect specific types of motor faults are measuring coils embedded in the air gap. These coils measure the induced inner voltage, due to the variable magnetic flux that this coil comprises. This voltage is used in further data processing and analysis in order to detect a specific motor fault. The measuring coil is designed in the PCB technique with geometric dimensions corresponding to the stator tooth of the analyzed motor. The inductive distance sensors are used as auxiliary sensors during the static eccentricity measurement. The following induction motor parameters were recorded with laboratory measuring unit *DEWE 2522*: stator current, stator voltage, speed, the induced voltage in measuring coils and voltage signals from inductive sensors. An integral part of the laboratory unit is the software program *DEWESOFT*. The software performs data processing of the measured values. 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 in the amount  $\pm 17,74\%$ .

### **Magnetic field measurement based on the induced voltage in measuring coils**

This chapter describes the methodology of magnetic field measurement based on the induced voltage in measuring coils. Also, within the chapter is described the new innovative method based on the differential measurement of the magnetic field with two serial connected measuring coils. These coils are installed on the places in the machine which have by absolute value equal magnetic flux. The distance between the measuring coils is  $n \cdot \tau_p$ , where  $\tau_p$  is a pole pitch, and  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$  is a multiple of the pole pitch. The measuring coils 1 and 2 are installed on the stator tooth, so in this way, the area through which the magnetic field is measured is strictly defined. With this type of installation, the area on which a magnetic field is measured is equal for both measuring coils, which is crucial for this differential measurement method. In the dissertation, this method was used as a basis for further research. Namely, for reliable fault detection and mutual identification of particular rotor faults, it is necessary to install at least four measuring coils in the air gap which are mutually spaced for a pole pitch. When installed in this way, it is possible on the induced voltage basis to detect and mutually recognize rotor faults such as broken rotor bar, broken rotor ring, and static eccentricity.

### **Induction motor electromagnetic analysis by FEM method**

This chapter describes FEM simulations that were conducted on the motor model designed in commercial software *Infolytica Magnet*. First, FEM calculation for a normal motor operation was performed. Afterward, using the same FEM model with corresponding modifications the various rotor faulty states were simulated. The first analyzed rotor fault was one broken rotor bar of a squirrel-cage induction motor. Also, the faulty rotor state with two broken bars (adjacent and randomly selected bars) was analyzed. The second analyzed fault was a broken rotor ring. In the case of these two specific faults, the voltage difference between the induced voltage in two measuring coils spatially spaced for  $2\tau_p$  was analyzed. Based on voltage difference analysis, it is concluded which fault is present on the rotor of the induction motor. The third specific analyzed fault of the squirrel-cage motor was the appearance of rotor static eccentricity. In the FEM model, the rotor of the induction motor was shifted in the direction of  $\pm x$  and  $\pm y$  axes. In order to detect the presence of static eccentricity, the influence on the induced voltage in four measuring coils spatially spaced for a pole pitch was observed and

analyzed. Based on the RMS value change of the induced voltage in the coils, the presence of rotor displacement and static eccentricity is determined. Except for separately analyzed faults, a combination of rotor faults has also been analyzed. The main goal was to verify whether it is possible with the methodology based on induced voltages mutually recognize analyzed faults. The example of fault combination (static eccentricity and broken rotor bar) is successfully verified. Based on the FEM calculations, an optimal layout and the required number of measuring coils for fault detection has been determined. According to the research results, it is necessary to install at least four measuring coils spatially spaced for a pole pitch in the air gap of the analyzed motor.

### **Induction motor measurement results**

In this chapter, the results obtained by the measurement on the redesigned traction induction motor are shown. In order to verify FEM results, it was necessary to perform experimental measurement on the motor. For the start, similar to FEM calculations, the measurement in normal motor operation was performed. Afterward, a series of measurements were performed when static eccentricity of the rotor is present in the motor. In order to simulate static eccentricity, the rotor of the motor has been continuously shifted in the direction of  $\pm x$  and  $\pm y$  axes. These measurement results have verified results that were obtained by the FEM calculations, in case of this specific rotor fault. After these measurements, the motor was disassembled in order to break one rotor bar. When the break of the rotor bar was made, the motor was re-assembled and the new series of measurement with one rotor broken bar were performed. Again, the obtained results have verified FEM results, in case of this specific rotor fault. The motor was again disassembled in order to break one more rotor bar. The motor was then re-assembled the second time and the new set of measurement in case of two broken rotor bars was performed. The obtained results have again verified the FEM calculation for the case of this specific fault. In order to analyze the following specific rotor fault – broken rotor ring, it was necessary to disassemble the motor for the third time. To perform and analyze this fault, there was another identical rotor available similar to the first one. On that rotor, the break of the rotor ring was performed. The motor was then re-assembled the third time and a new measurement in case of broken rotor ring was performed. The obtained results have again verified FEM calculation in the case of this specific fault. Also, the measurement on two combined rotor faults (one broken bar and static eccentricity) was performed. For all these faults the induced voltages in four measuring coils installed in the air gap of the induction motor were analyzed.

### **Comparison of the induced voltage in the measuring coils obtained by FEM and measurement**

In this chapter, the comparison between calculated and measured results was performed. First, the induced voltages in the measuring coils were compared, and then the voltage difference between the measuring coils spatially spaced for  $2\tau_p$ . In the case of a broken rotor bar, it is especially interesting to analyze and compare the voltage difference obtained by FEM calculation and measurement. For the analyzed case, the comparison shows that good alignment was achieved. The similar situation is with the comparison result obtained for two broken rotor bars rotor and in the case when the motor operates with a broken rotor ring. In the case of comparison results for static eccentricity, especially interesting is to analyze and compare the induced voltages in measuring coils. From the comparison, it is established that the good alignment between FEM calculations and measurement had been achieved for this rotor fault.

### **Algorithm for induction motor faults recognition based on the measuring coils induced voltage**

This chapter describes the algorithm and the methodology to recognize rotor faults of the squirrel-cage motor based on the induced voltages in the measuring coils spatially spaced for the pole pitch. Based on the FEM calculations and measurements, the goal of having a designed functional algorithm for early fault detection and reliable recognition of rotor faults was achieved. In the chapter is presented and described flowchart of the proposed algorithm. Furthermore, the two special algorithms were designed, based on the obtained research results. The input parameters for the proposed algorithm are induced voltages in four measuring coils spatially spaced for pole pitch. The first algorithm is intended for early and reliable detection of the broken rotor bars and the broken ring of the squirrel-cage induction motor. Based on the voltage difference obtained from induced voltages in measuring coils spatially spaced for  $2\tau_p$ , it is possible to detect and reliably recognize the fault of the squirrel-cage rotor. The algorithm mutually recognizes the broken bar and the broken ring of the rotor with a high degree of reliability. The second algorithm is proposed for early and reliable detection of the rotor static eccentricity. The proposed algorithm uses induced voltage in four measuring coils. In the case of the broken rotor bars and ring, the algorithm uses voltage difference between two induced voltages in measuring coils spatially spaced for  $2\tau_p$ . In the case of static eccentricity, the difference between the RMS value of each measuring coil installed in the air gap of the induction motor is analyzed. If there is a deviation between RMS

values greater than the permissible value, the algorithm alarms the end user to the occurrence of a static eccentricity. Both algorithms for output results give graphical signalization with the corresponding message of the occurrence of each fault. The proposed algorithm is designed in the *Octave* software.

## Conclusion

Within this dissertation, the field of rotor faults detection of the squirrel-cage motor has been analyzed. The analyzed faults were: one or more broken rotor bar, broken rotor ring, and static eccentricity appearance. For early and reliable detection of listed faults, the methodology based on the induced voltages in measuring coils installed on the stator tooth has been applied. These coils are mutually spatially spaced for pole pitch. Based on the induced voltage in the coils, it is possible with a high degree of reliability to detect and recognize rotor faults. In the case of the broken rotor bar or ring, the voltage difference between two induced voltage in measuring coils spaced for  $2\tau_p$  has been analyzed. In the case of static eccentricity, induced voltage processing implies a determination of the induced voltage RMS value in four measuring coils spaced for pole pitch ( $\tau_p$ ). After these values are determined, they are mutually compared in order to determine their mutual deviation, i.e. to determine their asymmetry. To analyze and determine the required and optimal number of measuring coils, and also the character of each rotor fault, first the FEM calculations have been performed. To confirm the thesis and verify FEM results for the each analyzed fault, the corresponding measurements in the laboratory have been performed. The calculations and measurements confirmed that for the functionality of this rotor fault detection methodology, it is necessary to install at least four measuring coils in the air gap of the motor. The first scientific contribution had needed to confirm the various impact of each fault on the induced voltage in the measuring coils. The FEM calculations and measurements have shown that each rotor fault has a specific characteristic that is the consequence of the induced voltages. The second scientific contribution is manifested in determining the optimal layout and position of the measuring coils for fault detection. FEM calculations and corresponding measurements determine the required number, layout, and position of measuring coils in the air gap of a motor, which is shown in the dissertation. The coils for reliable and early fault detection must be positioned on the stator tooth, mutually spaced for the pole pitch. According to the performed research, at least four measuring coils have to be installed in the air gap of a motor. The third scientific contribution is related to the design of the algorithm for

rotor fault detection based on the measured induced voltage in the measuring coils. The proposed algorithm consists of two separate algorithms that are based on the derived specific characteristics of each fault. The methodology, which is based on the induced voltage in measuring coils, mutually spaced for pole pitch, has shown its usefulness and reliability in the early rotor fault detection of the squirrel-cage motor.

**Keywords:** induction motor, squirrel-cage rotor, broken rotor bar, broken rotor ring, static eccentricity, measuring coil, induced voltage, magnetic induction, pole pitch, algorithm

## Sadržaj

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Uvod.....                                                                                                                                                      | 1   |
| 2. Pregled stanja tehnike i metoda detekcije kvarova .....                                                                                                        | 4   |
| 2.1. Vrste kvarova asinkronog motora .....                                                                                                                        | 4   |
| 2.1.1. Kvarovi ležaja.....                                                                                                                                        | 5   |
| 2.1.2. Statorski kvarovi.....                                                                                                                                     | 6   |
| 2.1.3. Rotorski kvarovi .....                                                                                                                                     | 7   |
| 2.1.4. Ostali kvarovi .....                                                                                                                                       | 7   |
| 2.2 Metode otkrivanja kvarova asinkronog motora .....                                                                                                             | 9   |
| 3. Asinkroni motor za eksperimentalna mjerenja i mjerna oprema .....                                                                                              | 14  |
| 3.1. Asinkroni motor – objekt mjerenja .....                                                                                                                      | 14  |
| 3.2. Mjerna oprema .....                                                                                                                                          | 20  |
| 3.2.1. Mjerni svitak.....                                                                                                                                         | 21  |
| 3.2.2. Induktivni senzor .....                                                                                                                                    | 23  |
| 3.2.3. Laboratorijska mjerna stanica .....                                                                                                                        | 26  |
| 3.2.4. Mjerna nesigurnost.....                                                                                                                                    | 28  |
| 4. Mjerenje magnetskog polja pomoću induciranog napona u mjernim svicima .....                                                                                    | 31  |
| 5. Elektromagnetski proračun motora metodom konačnih elemenata.....                                                                                               | 39  |
| 5.1. Izrada simulacijskog modela.....                                                                                                                             | 39  |
| 5.2. Rezultati proračuna za ispravno stanje .....                                                                                                                 | 43  |
| 5.3. Analiza utjecaja statičkog ekscentriciteta i oštećenja kaveza asinkronog motora na inducirane napone u mjernim svicima dobivena numeričkim proračunima ..... | 48  |
| 5.3.1. Utjecaj statičkog ekscentriciteta rotora na inducirane napone u mjernim svicima .....                                                                      | 48  |
| 5.3.2. Utjecaj prekida jednog i više štapova kaveznog namota na inducirane napone u mjernim svicima.....                                                          | 80  |
| 5.3.3. Utjecaj prekida prstena kaveznog namota na inducirane napone u mjernim svicima .....                                                                       | 85  |
| 5.3.4. Utjecaj kombinacije kvarova rotora na inducirane napone u mjernim svicima .....                                                                            | 87  |
| 5.4. Optimalni raspored i položaj mjernih svitaka za određivanje kvarova kaveznog rotora .....                                                                    | 91  |
| 6. Rezultati mjerenja na motoru.....                                                                                                                              | 92  |
| 6.1. Rezultati mjerenja za ispravno stanje.....                                                                                                                   | 95  |
| 6.2. Utjecaj statičkog ekscentriciteta rotora na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima .....                                                              | 98  |
| 6.3. Utjecaj prekida jednog i više štapova kaveza rotora na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima .....                                                   | 119 |
| 6.4. Utjecaj prekida prstena kaveza rotora na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima.....                                                                  | 123 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.5. Utjecaj prekida jednog štapa kaveza rotora uz prisutnost statičkog ekscentriciteta na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima ..... | 125 |
| 7. Usporedba induciranih napona u mjernim svicima dobivenih proračunima i mjerenjima                                                           | 129 |
| 7.1 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod prekida jednog štapa rotora .....                                    | 129 |
| 7.2 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod prekida dva štapa rotora.....                                        | 131 |
| 7.3 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod prekida prstena kaveza rotora.....                                   | 132 |
| 7.4 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod statičkog ekscentriciteta iznosa 25 %.....                           | 134 |
| 8. Algoritam za prepoznavanje pojedinih vrsta kvarova temeljem induciranih napona u mjernim svicima.....                                       | 136 |
| 8.1 Svojstvene karakteristike kvara rotora motora .....                                                                                        | 136 |
| 8.2 Algoritam za otkrivanje kvara rotora motora .....                                                                                          | 142 |
| 8.2.1 Algoritam za otkrivanje prekida štapova i prstena rotora .....                                                                           | 143 |
| 8.2.2 Algoritam za otkrivanje pojave statičkog ekscentriciteta rotora.....                                                                     | 155 |
| 9. Zaključak.....                                                                                                                              | 165 |
| 10. Literatura.....                                                                                                                            | 168 |
| Popis oznaka.....                                                                                                                              | 178 |
| Popis slika .....                                                                                                                              | 181 |
| Popis tablica .....                                                                                                                            | 189 |
| Prilog A: Kôd algoritma za otkrivanje prekida kaveza rotora .....                                                                              | 190 |
| Prilog B: Kôd funkcije za određivanje praga napona i određivanje broja vrhova napona.....                                                      | 192 |
| Prilog C: Kôd algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta rotora .....                                                                   | 197 |
| Životopis.....                                                                                                                                 | 200 |
| Popis objavljenih radova .....                                                                                                                 | 200 |
| Biography .....                                                                                                                                | 203 |

## **1. Uvod**

Električni rotacijski strojevi uključeni su u sva područja modernog života, proizvode se u raznim veličinama, a ispunjavaju svoje zadatke samostalno ili kao dio kompleksnog procesa. Većina električnih strojeva manjih snaga ne zahtijeva nadzor, međutim industrija i konkurentno gospodarstvo, izravno ili neizravno, ovise o strojevima velikih snaga i složenosti. Asinkroni motori jedna su od najraširenijih vrsta strojeva te ostvaruju ključnu ulogu u raznim industrijskim postrojenjima poput elektrana, rafinerija nafte, kemijskih postrojenja, ljevaonica metala, crpnih stanica, mlinova ugljena te pogona za proizvodnju papira. Danas strojevi rade na samim granicama izdržljivosti i postoji mogućnost velike ekonomske štete u slučaju ispadanja stroja iz pogona. Zbog toga se postavljaju visoki zahtjevi na njihov pouzdan i siguran rad. U ključne strojeve, u pravilu se ugrađuju zaštitni uređaji i određene vrste monitoringa i zaštite, s ciljem što ranijeg otkrivanja kvara te po mogućnosti i uzroka kvara (dijagnostika) stroja.

Uzroci kvarova na asinkronom motoru posljedica su električnih i mehaničkih prilika te uvjeta pogona i okoline kojima je izložen. Prema provedenim istraživanjima pokazano je da se najveći broj kvarova događa na ležajevima, zatim slijede kvarovi na statoru, potom kvarovi na rotoru te ostali kvarovi kao što su različite vrste ekscentriciteta [1 – 4]. Pojava nekog od navedenih kvarova utječe na pogonske karakteristike asinkronog motora te uzrokuje pojave poput:

- nesimetrije faznih struja i magnetskog polja u zračnom rasporu,
- povećane pulzacije momenta,
- smanjenje razvijenog momenta,
- oscilacije u brzini vrtnje,
- povećanje gubitaka, vibracija i buke.

Sve to rezultira smanjenjem korisnosti i dodatnim zagrijavanjem stroja, a naposljetku dovodi i do mogućih težih oštećenja i iznenadnih prekida u njegovu radu.

Budući da je motor složen elektromehanički sustav, utvrđivanje vrste i uzroka kvara nije nimalo jednostavan zadatak. U svrhu otkrivanja kvara na asinkronom motoru, a i općenito na električnim strojevima, razvijen je niz metoda i tehnika za njihovo otkrivanje koje se temelje na mjerenju, praćenju i analizi različitih parametara stroja. Danas monitoring i zaštitni sustavi koriste digitalne procesore koji omogućavaju primjenu složenih kriterija za određivanje prisutnosti kvara u stroju. Odabir mjerenja, metode detekcije i procedura obrade izmjerene signala u svrhu otkrivanja kvara predstavljaju ekspertno znanje. Činjenica je da se broj

osoblja zadužen za održavanje konstantno smanjuje te je naglasak upravo stavljen na ekspertne monitoring sustave koji trebaju primijeniti dugogodišnje znanje i iskustvo ljudi, nadograditi ga te omogućiti točnu detekciju kvarova. Osim same detekcije kvara, od sustava monitoringa danas se traži i dijagnostika kvara koja treba utvrditi uzrok i mjesto nastanka kvara. Brojne metode detekcije kvara razvijene su u tu svrhu i ugrađene u sustave zaštite i monitoringa [2].

Metode otkrivanja kvarova u velikoj mjeri rezultat su dugogodišnjeg ispitivanja, mjerenja i praćenja stanja asinkronog motora. Međutim, danas se nove metode otkrivanja kvarova baziraju na numeričkim proračunima primjenom metode konačnih elemenata. Upotreba komercijalnih programskih paketa temeljenih na metodi konačnih elemenata danas je postala svakodnevica u projektiranju električnih strojeva. Njihova primjena omogućila je istraživanje različitih pogonskih stanja strojeva. Simulacijom ispravnih i kvarnih stanja na modelima, omogućeno je istraživanje i analiza ponašanja stroja u nepovoljnim uvjetima koja ne zahtijeva djelomično ili potpuno uništenje stroja [9, 10]. Mnoge metode su zbog potreba za simulacijom raznih vrsta kvarova zahtijevale trajnu deformaciju ili oštećenje dijelova ispitivanog stroja prilikom eksperimentalnog istraživanja. Upotrebom ovakvih numeričkih programa koji vrlo dobro opisuju fizikalne pojave koje se javljaju u strojevima, izbjegnuti su troškovi (primjerice nepotrebno trajno uništenje dijelova stroja) koji nastaju kada se na ispitivanom stroju želi provjeriti funkcionalnost pojedine metode. U disertaciji, teorijska razmatranja bazirana na elektromagnetskom proračunu provedena su u komercijalnom programskom paketu Infolytica MagNet [11]. Unutar programskog sučelja tog paketa izrađen je model asinkronoga kaveznog motora za simulaciju ispravnog i niza kvarnih stanja. U svrhu potvrde rezultata numeričkog proračuna provedena su u laboratoriju mjerenja na motoru posebno dorađenom za simuliranje pojedinih vrsta kvarova.

U sklopu doktorske disertacije predstavljena je metoda koja se temelji na mjerenju magnetskog polja u zračnom rasporu pomoću inducirano napona u mjernim svicima ugrađenima u stroj [5, 6]. Navedena metoda, ali i sam princip korišteni su za pouzdano i jednoznačno otkrivanje kvarova kaveznog rotora i to za sljedeće vrste oštećenja:

- prekid jednog ili više štapova kaveza,
- prekid prstena kaveza,
- pojavu statičkog ekscentriciteta.

Odabran je pristup temeljen na analizi magnetskog polja u zračnom rasporu jer su brojna istraživanja pokazala da se mjerenjem magnetskog polja unutar i izvan stroja mogu otkriti

kvarovi poput međuzavojnoga kratkog spoja, prekida štapa i prstena kaveza te ekscentriciteta [5, 6, 7, 28, 34, 45, 79, 80].

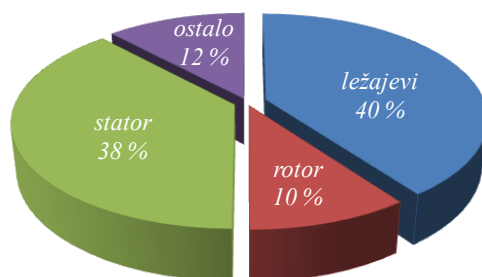
Ova disertacija predstavlja nastavak istraživanja koja su provedena na sinkronom stroju, gdje su za detekciju međuzavojnih kratkih spojeva na armaturnom i uzbudnom namotu korišteni mjerni svici i Hallov senzor [8]. U disertaciji je obrađena problematika otkrivanja kvarova koji se javljaju na asinkronom kaveznom motoru i to posebno kvarova koji su povezani s rotorom. Cilj rada je doprinos na području ranoga i pouzdanog prepoznavanja kvarova električnih rotacijskih strojeva temeljem analize magnetskog polja u zračnom rasporu stroja. Također, svrha je da se nova saznanja o otkrivanju kvarova analizom magnetskog polja u zračnom rasporu implementiraju u ekspertne monitoring sustave za otkrivanje kvarova rotacijskih strojeva, odnosno da imaju industrijsku primjenu čime bi se postiglo bolje gospodarenje ključnom elektroenergetskom opremom.

## 2. Pregled stanja tehnike i metoda detekcije kvarova

U ovom poglavlju prikazan je pregled stanja tehnike na području otkrivanja kvarova asinkronoga kaveznog motora. Prikazane su i opisane vrste kvarova motora, a unesen je i kratak pregled postojećih metoda za otkrivanje pojedinih kvarova motora. Također, istaknuta je i važnost praćenja stanja kritičnih strojeva te potreba za ugradnjom monitoring (nadzornih) sustava na iste, ali i prednosti koje takvi sustavi omogućavaju.

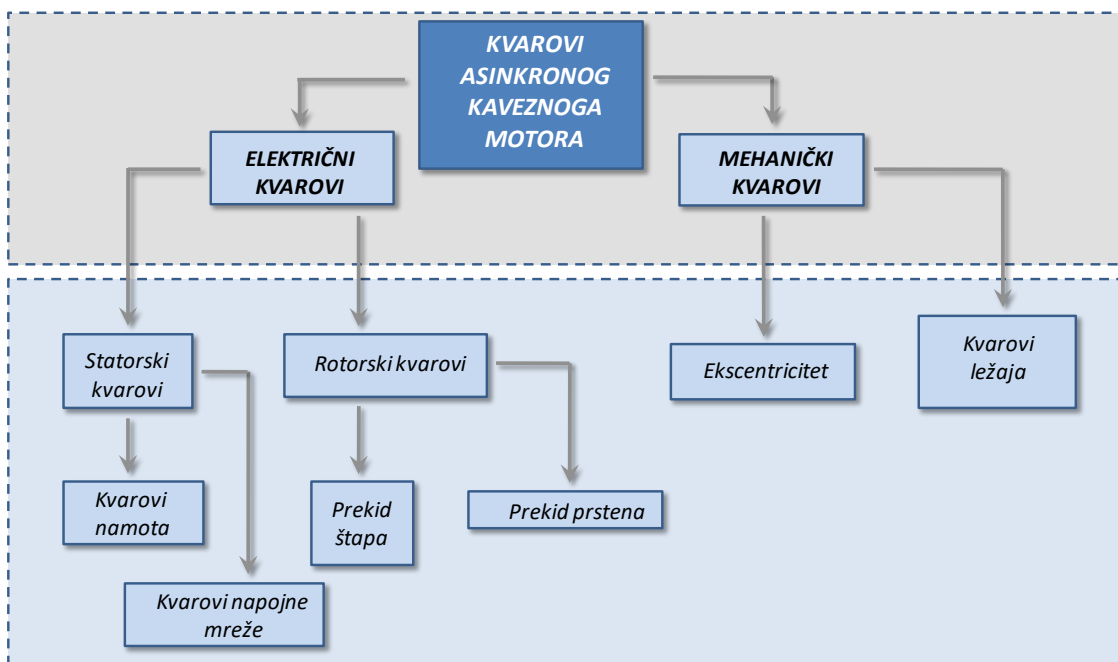
### 2.1. Vrste kvarova asinkronog motora

Pregledom relevantne literature i provedenih istraživanja [1, 2, 3, 4, 16, 19, 25], izvršena je raspodjela kvarova koji se pojavljuju na asinkronom kaveznom motoru prema glavnim dijelovima stroja: kvarovi povezani sa statorom, kvarovi na rotoru, kvarovi na ležajevima te ostali kvarovi, slika 2.1.



Slika 2.1 Raspodjela kvarova po glavnim komponentama motora

Kvarove motora detaljnije se može podijeliti prema prirodi njihovog nastajanja, odnosno na električne i mehaničke kvarove što je i prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2 Vrste kvarova asinkronog motora

### 2.1.1. Kvarovi ležaja

Prema istraživanjima [1 – 4], kvarovi na ležajevima najčešća su vrsta kvarova na asinkronim motorima te ovisno o pojedinoj studiji, njihova pojava varira u rasponu od 40% do 50%. Uzroci nastanka ovog kvara pretežito su mehaničke, ali mogu biti i električne prirode. Većina električnih strojeva koristi kuglične ili valjkaste ležajeve. Oni se sastoje od unutarnjega i vanjskog prstena te niza kuglica ili valjčića smještenih u odgovarajuću kliznu stazu, koje rotiraju unutar tih prstenova [20, 46]. Oštećenja ležaja uslijed takve konstrukcije, mogu se podijeliti na: oštećenja klizne staze vanjskog prstena, oštećenja klizne staze unutarnjeg prstena te oštećenja kuglica i kaveza ležaja. Ova oštećenja stvaraju specifične frekvencije vibracija koje su funkcija geometrije ležaja i prikazane su sljedećim izrazima [1, 46]:

- za oštećenje vanjske staze prstena:

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

- za oštećenje unutarnje staze prstena:

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

- za oštećenje kuglice 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  $f_v$  – frekvencija vibracije,  $f_r$  – frekvencija rotacije,  $N$  – broj kuglica,  $b_d$  – promjer kuglice,  $d_p$  – promjer koraka kuglice ležaja,  $\beta$  – kut kontakta kuglice sa stazom.

Do oštećenja ležaja dolazi i zbog stalnih unutarnjih naprezanja tijekom rada uzrokovanih vibracijama, vlastitim ekscentricitetom te prisutnosti osovinskih (induktivnog karaktera) i ležajnih (kapacitivnog karaktera) struja [1, 21]. Osovinske struje mogu se pojaviti uslijed magnetske nesimetrije i homopolarnog toka, a ležajne struje uslijed lutajućih struja zbog napona prema uzemljenju (*common mod* – kod pretvarača koji nemaju galvansko odvajanje). Također, do oštećenja dolazi i zbog raznih vanjskih uzroka poput [1]:

- onečišćenja zbog prašine i sitnih čestica nastalih abrazijom ili zbog korozivnog djelovanja, npr. vode, kiselina i sl.;

- nepropisnog podmazivanja (premalo ili previše) koje dovodi do zagrijavanja i abrazije;
- nepravilne ugradnje ležajeva, npr. nepravilno umetanje ležaja na osovinu ili ležajni štit.

Zamor materijala ležaja također može biti jedan od uzroka oštećenja, a može se manifestirati, npr. u povećanju vibracija i u razini buke.

### **2.1.2. Statorski kvarovi**

Pojava kvarova na statoru asinkronog motora kreće se u rasponu od 30 % do 40 %, ovisno o provedenom istraživanju [1 – 4]. Ovi kvarovi uglavnom su posljedica oštećenja nastalih na izolacijskome sustavu namota. Općenito, do oštećenja izolacije dolazi uslijed termičkih, električnih i mehaničkih naprezanja te uvjeta okoline u kojoj se ona nalazi [2]. Postoji više razloga koji dovode do degradacije izolacije, a posebno se ističu sljedeći:

- visoke temperature magnetske jezgre i namota statora;
- elektromagnetske sile (vibracije);
- olabavljenje limova statora, utorskih klinova i spojeva;
- olabavljenje glave namota;
- onečišćenje zbog ulja, vlage i prašine;
- mehanička naprezanja uslijed udarnih kratkih spojeva te pokretanja i zaustavljanja motora;
- električna pražnjenja u izolacijskom sustavu;
- propuštanje rashladnog sustava;
- naponsko naprezanje uslijed prevelike jakosti električnog polja i to kod motora napajanih iz pretvarača zbog promjene brzine porasta napona i frekvencije.

Najčešća vrsta kvarova na statorskom namotu su međuzavojni kratki spojevi uzrokovani probojem izolacije između dvaju susjednih zavoja u vodiču [1, 8, 25]. Ovi kvarovi, ukoliko nisu na vrijeme otkriveni, mogu dovesti do težih kvarova, poput međufaznoga kratkog spoja te kratkog spoja faze sa zemljom, a naposljetku i do potpunog uništenja stroja [1, 8].

### **2.1.3. Rotorski kvarovi**

Prema istraživanjima [1, 2, 3, 4, 25], 10 % od ukupnog broja kvarova na asinkronim kaveznim motorima povezano je s rotorom. Kavez rotora može biti lijevani ili zavareni, tj. sastavljen od štapova uloženi u utore koji su bočno kratko spojeni prstenima. Obzirom na konstrukciju kaveza, kvarovi koji se događaju jesu pucanje jednog ili više štapova te pucanje prstena kaveza na jednom ili više mjesta. Više je razloga koji dovode do ove vrste kvara. Neki od najznačajnijih uzroka nastanka prekida štapa ili prstena mogu biti [1, 2]:

- termička naprezanja kod preopterećenja;
- naprezanja izazvana elektromagnetskim silama, silom jednostranoga magnetskog privlačenja, elektromagnetskim vibracijama;
- naprezanja izazvana greškama u procesu proizvodnje, primjerice radi lošeg lijeva ili loših zavora;
- dinamička naprezanja izazvana centrifugalnim silama te čestim pokretanjima, zaustavljanjima i reverziranjima;
- naprezanja izazvana uvjetima pogona i okoline, npr. kontaminacija i abrazija rotorskog materijala kemikalijama i vlagom;
- mehanička naprezanja uslijed zamora materijala, oštećenja paketa ili kvarova ležaja.

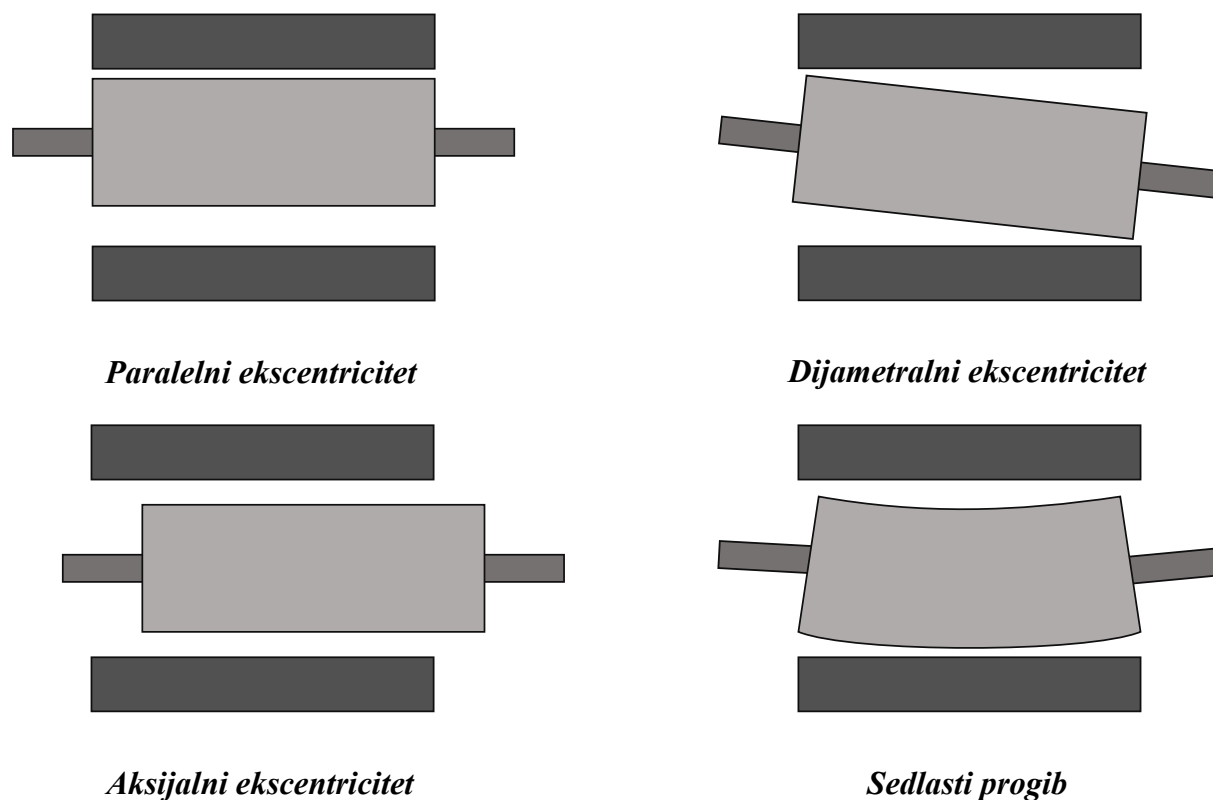
### **2.1.4. Ostali kvarovi**

U istraživanjima [1, 4, 25], 12 % od ukupnog broja kvarova na asinkronim kaveznim motorima odnosi se na druge vrste kvarova. Ovdje se u pravilu podrazumijeva da je riječ o kvarovima nastalima zbog pojave ekscentriciteta. Ekscentricitet stroja je pojava kada obod rotora nije jednoliko udaljen u odnosu na provrt statora, tj. postoji nejednoliki zračni raspor. Pojava ekscentričnosti rotora može se opisati položajem i vrstom gibanja rotora u odnosu na stator. Prema položaju rotora u odnosu na stator, postoje sljedeće vrste ekscentričnog pomaka:

- aksijalni,
- radijalni pomak osi rotora,
- te sedlasti progib vratila (slika 2.3).

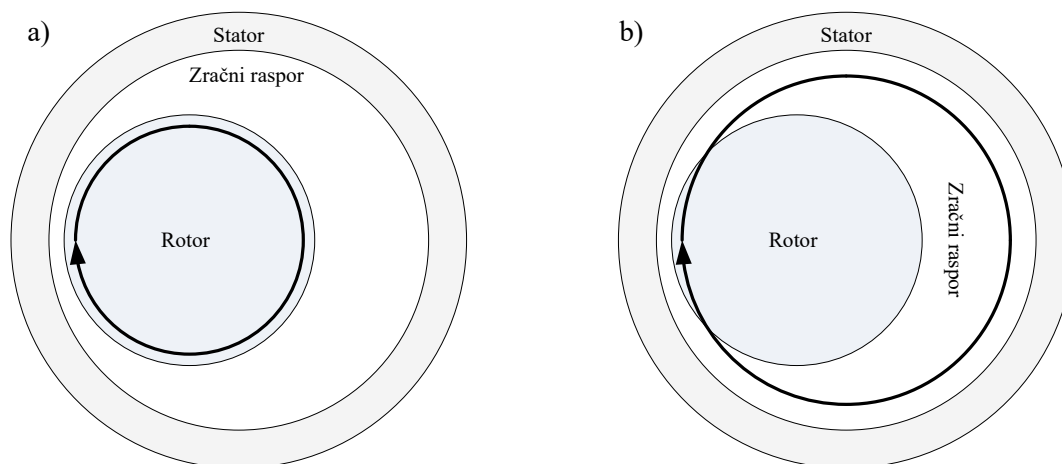
Prema vrsti gibanja aksijalne osi rotora postoje dvije vrste ekscentriciteta: statički i dinamički (slika 2.4) [1, 15, 63]. Statički ekscentricitet je gibanje kod kojeg se rotor motora vrti dok točka najmanjega zračnog raspora miruje u prostoru. Njegov nastanak može biti uzrokovan ovalnošću

statorske jezgre, netočnim centriranjem rotora ili statora [1]. U slučaju dinamičkog ekscentriciteta, centar rotora nije u centru rotacije te položaj točke najmanjega zračnog raspora rotira zajedno s rotorom. Ovaj pomak može uzrokovati više čimbenika poput mehaničke deformacije osovine, pojačano trošenje ležaja, pojave mehaničke rezonancije kod kritičnih brzina [1].



Slika 2.3 Vrste ekscentričnog pomaka rotora

U stvarnosti određena razina statičkoga i dinamičkog ekscentriciteta uvijek je prisutna. Dopusćena razina ekscentriciteta prema dostupnim istraživanjima iznosi do 10 % veličine zračnog raspora stroja [66]. Ekscentricitet stroja, kao i sve prije navedene vrste kvarova, ako nije na vrijeme otkriven, može rezultirati znatnim oštećenjima (primjerice, mehanički kontakt rotora sa statorom) te dovesti do prekida rada motora i velike materijalne štete.



Slika 2.4 Ekscentricitet: a) statički; b) dinamički

## 2.2 Metode otkrivanja kvarova asinkronog motora

Pravovremeno otkrivanje kvarova motora, tj. njihovo otkrivanje u samom početku nastajanja danas je od iznimne važnosti. Tom je cilju velik broj inženjera i znanstvenika posvetio značajnu pažnju te otkrio, razvio i primijenio u svrhu dijagnostike i monitoringa motora široki spektar metoda kojima je moguće otkriti prisutnost kvarova na električnim motorima. U osnovi metode detekcije zasnivaju se na snimanju i mjerenju signala s određenih senzora i mjernih svitaka koji se potom obrađuju putem računala odgovarajućim algoritmima te se na osnovu toga izvode određeni zaključci. Isto tako, za svaki kvar svojstveno je da proizvodi i uzrokuje specifične pojave koje signaliziraju vrstu kvara. Metode primijenjene u otkrivanju kvarova asinkronih motora, a i općenito električnih rotacijskih strojeva u pravilu su spoj više različitih grana znanosti i tehnologije [1, 81]. Kronološki gledano, metode za otkrivanje kvarova mogu se grupirati na sljedeći način:

- Vizualni pregled stanja stroja (najstariji način za ocjenu rada stroja),
- Mjerenje fizikalnih veličina:
  - *električnih veličina (struja, napon),*
  - *vibracija i buke,*
  - *temperature i toplinskih slika stroja,*
  - *oscilacija u brzini vrtnje,*
  - *elektromagnetskog momenta,*
  - *veličina električnoga i magnetskog polja u i izvan stroja (mjerni svitak, Hall senzor),*

- *otpora izolacije, naponske čvrstoće i parcijalnih izbijanja.*
- Korištenje numeričkog proračuna (modeli temeljeni na metodi konačnih elemenata) i usporedba s izmjerenim veličinama:
  - *metode zasnovane na proračunima polja.*
- Kombinacija mjerenja i proračuna, odnosno korištenje umjetne inteligencije:
  - *neizrazita logika,*
  - *neuronske mreže,*
  - *genetski algoritmi,*
  - *ekspertni sustavi.*

Ovisno o pojedinom dijelu stroja, prate se i analiziraju veličine od interesa te se prema tome primjenjuje odgovarajuća metoda za otkrivanje i dijagnostiku kvara. Tako u otkrivanju kvarova ležajeva prevladavaju metode koje se temelje na praćenju i analizi vibracija motora [1, 17, 26]. Signal vibracija snima se odgovarajućim senzorima na određenim dijelovima stroja (npr. kućište, ležajni štiti). Osim analize vibracija, oštećenje ležaja moguće je otkriti praćenjem statorske struje, gdje se analizira spektar struje s ciljem otkrivanja karakterističnih harmonika [1, 14, 22, 26, 35, 46, 70]. Metodama koje se temelje na analizi maziva, emisiji buke, monitoringu temperatura i termografiji ležajeva moguće je otkriti oštećenja ležajeva [12, 23, 46, 83].

Kvarove statorskog namota, prema [1, 26, 27], moguće je otkriti mjerenjem magnetskog toka izvan stroja zavojnicom koncentrično namotanom oko osovine motora (uzdužna komponenta). U [28, 29, 30] prikazano je otkrivanje međuzavojnih kratkih spojeva analizom rasipnoga magnetskog toka izmjerenog senzorima i posebno izrađenim zavojnicama smještenim na kućištu i oko osovine stroja, a u [8] opisana je mogućnost otkrivanja kvarova praćenjem magnetskog polja u zračnom rasporu putem mjernih svitaka i senzora ugrađenih unutar stroja. Prema [1], pojava inverzne komponente struje može biti posljedica nastanka kvarova u statorskom namotu te su brojni istraživači razvili niz tehnika koje koriste harmonijsku analizu i inverzne komponente u otkrivanju kvarova [31, 32, 37]. Snimanjem statorske struje i analizom njezinoga harmonijskog spektra te utvrđivanja pojave harmonika na karakterističnim frekvencijama [1, 27, 35], moguće je otkriti prisutnost međuzavojnih kratkih spojeva. U [27], analiza vibracija kućišta navedena je kao još jedna metoda za otkrivanje međuzavojnih kratkih spojeva.

Prema [1, 26, 35, 42, 57, 58, 82], pojavu ekscentriciteta u motoru moguće je otkriti analizom harmonijskog spektra struje, analizom vibracija motora, analizom rasipnoga magnetskog toka te analizom vektora statorskog napona i struje.

Prekid štapa moguće je otkriti praćenjem i analizom aksijalnih vibracija [1, 26, 44] te vibracija statora [84], a u [33], kao metoda detekcije, opisana je infracrvena termografija. Prema [34], prekinuti štap moguće je otkriti vremensko-frekvencijskom analizom induciranih napona u svicima smještenima oko zuba i jarma statora te pomoću svitka smještenog na kućište motora. Ovi kvarovi se, također, mogu otkriti i analizom aksijalnoga magnetskog rasipnog toka u osovini dobivenog pomoću zavojnice ugrađene oko osovine motora [1]. U [43], trenutna brzina vrtnje predstavljena je kao parametar za utvrđivanje puknuća štapa rotora. Pojava induciranih napona u osovini motora također može biti indikator puknuća štapa kaveza rotora [44]. Prema [45], mjerenjem i analizom gustoće magnetskog polja dobivenog Hallovim senzorom smještenim između zavoja statorskog namota, moguće je otkriti prekid jednog ili više štapova. Metoda zasnovana na analizi elektromagnetskog momenta u zračnom rasporu kao parametra detekcije kvara opisana je u [67]. Mjerenje i analiza napona zvjezdišta (za zvijezda spoj) te ukupne struje triju faza (za trokut spoj) sa svrhom utvrđivanja puknuća kaveza moguće je uočiti u [74].

Međutim, jedna od najraširenijih i najčešće korištenih metoda u detekciji puknuća štapa i prstena kaveza, ali i ostalih vrsta kvarova je spektralna analiza statorske struje [1, 26, 35, 36, 40, 41, 42, 50, 52, 62, 85, 86]. Metoda se zasniva na mjerenju struje statora odgovarajućim strujnim transformatorom, najčešće u izvedbi strujnih kliješta. Zatim se vrši obrada izmjerene signala struje odgovarajućim algoritmom koji koristi brzu Fourierovu transformaciju (FFT) za dobivanje frekvencijskog spektra struje. Dobiveni spektar se potom analizira s ciljem uočavanja karakterističnih bočnih harmonika u okolini frekvencije napajanja, kao što je primjerice prikazano na slici 2.5. Iznosi frekvencija harmonika u struji statora karakteristični za pojedini kvar prikazani su sljedećima izrazima [1, 64, 76]:

- za prekid štapa:

$$f_{brb} = \left[ k \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm s \right] f_1 \text{ [Hz]}, k = 1, 2, 3, \dots, k \in N, \quad (2.5)$$

- za kratki spoj između zavoja statorskog namota:

$$f_{st} = \left[ \frac{n}{p} (1-s) \pm k \right] f_1 \text{ [Hz]}, n, k = 1, 2, 3, \dots, n, k \in N, \quad (2.6)$$

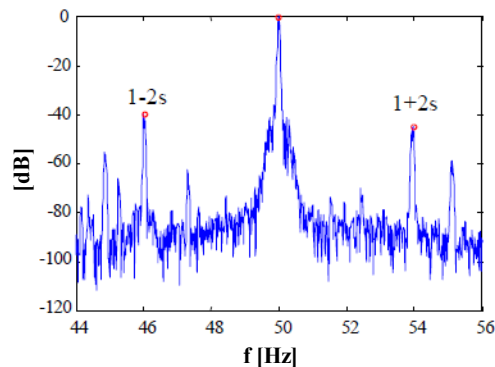
- za kvarove ležaja:

$$f_{bng} = |f_1 \pm n f_v| \text{ [Hz]}, n = 1, 2, 3, \dots, n \in N, \quad (2.7)$$

- za ekscentricitet:

$$f_{ecc} = \left[ (N_r \pm n_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm v \right] f_1 \text{ [Hz]}, n_d = \pm 1; v = 1, 3, 5, \dots, \quad (2.8)$$

gdje je:  $s$  – klizanje,  $f_1$  – frekvencija napajanja,  $p$  – broj pari polova,  $f_{brb}$  – frekvencija harmonika izražena kod prekid štapa rotora,  $f_{st}$  – frekvencija harmonika izražena kod međuzavoynih kvarova statorskog namota,  $f_{bng}$  – frekvencija harmonika izražena kod oštećenja ležaja,  $f_{ecc}$  – frekvencija harmonika izražena kod pojave ekscentriciteta,  $f_v$  – specifična frekvencija vibracija,  $N_r$  – broj štapova rotora,  $n_d$  – red ekscentriciteta,  $v$  – red statorskih vremenskih harmonika koji su prisutni u napajanju motora.



Slika 2.5 Frekvencijski spektar struje s izraženim bočnim harmonicima kod prekida jednog štapa [25]

Budući da su karakteristične frekvencije ovisne o klizanju, promjena opterećenja motora na njih znatno utječe jer dolazi do promjene frekvencijskog spektra, a time i iznosa bočnih harmonika. Problem se javlja i kod motora napajanih putem frekvencijskog pretvarača gdje se također zbog promjena u frekvencijskom sastavu struje mijenja iznos karakterističnih harmonika. Time je pouzdano otkrivanje puknuća štapa kaveza spektralnom analizom statorske struje otežano i predstavlja glavni nedostatak ove metode. U svrhu savladavanja ovih ograničenja u obradi signala struje primijenjene su još neke matematičke metode. Njima se želi postići izdvajanje značajki koje bi u dovoljnoj mjeri bile osjetljive na pojavu kvara, a samim time omogućile i pouzdano otkrivanje kvarova. Primjerice, u otkrivanju prekida štapa, za izdvajanje značajki iz struje statora, koje upućuju na kvar, korištene su valić transformacije. Spomenuta metoda koristi se za analizu vremenski promjenjivih i nestacioniranih signala te za rastavljanje signala na familiju valića koje prikazuje kao vremensko-frekventne komponente te potom analizira svaku komponentu u rezoluciji koja je prilagođena njenoj skali. Više o načinu primjene valić transformacije u detekciji kvarova asinkronog motora može se pronaći u [13, 47, 48, 49, 51, 53, 59, 76, 77, 78]. U [54] primijenjena je na poteznu struju motora valna analiza s ciljem utvrđivanja prekinutog štapa. Prema [56], kao jedan od indikatora prekida štapa kaveza korištena je anvelopa statorske struje. Kombinacija korištenja Hilbertove transformacije i spektralne analize struje

opisana je u [72, 87]. U [69, 70, 73, 75], prikazana je Parkova transformacija (grafička prezentacija struje motora Parkovim vektorom) i njezina primjena u otkrivanju kvarova motora.

U otkrivanju kvarova, danas se sve više koriste nove tehnike i metode zasnovane na umjetnoj inteligenciji. Temeljene su na konceptima kao što su neizrazita logika, neuronske mreže, genetski algoritmi i ekspertni sustavi [8, 38, 39, 60, 65, 68, 70, 88, 89, 90]. Može se zapravo reći da su to, u stvari, sustavi u koje su implementirani matematički modeli (MKE modeli) i proračuni (numerički i analitički) te ekspertna znanja dobivena na temelju dijagnostičkih i eksperimentalnih ispitivanja na električnim rotacijskim strojevima.

### **3. Asinkroni motor za eksperimentalna mjerenja i mjerna oprema**

U poglavlju je opisan objekt mjerenja – asinkroni motor na kojem su provedena specifična laboratorijska mjerenja i verifikacija rezultata numeričkih proračuna. Također su, prikazane i opisane glavne komponente asinkronog motora, korištena mjerna oprema, postupak mjerenja, odabrani mjerni senzori za detekciju kvarova i procjena mjerne nesigurnosti.

#### **3.1. Asinkroni motor – objekt mjerenja**

Eksperimentalna mjerenja provedena su na trofaznom asinkronom kaveznom motoru tipa V6A0J 205-04 koji je namijenjen za pogon Končarevoga niskopodnog tramvaja TMK 2200 (slika 3.1), proizvođača KONČAR – Generatori i motori.

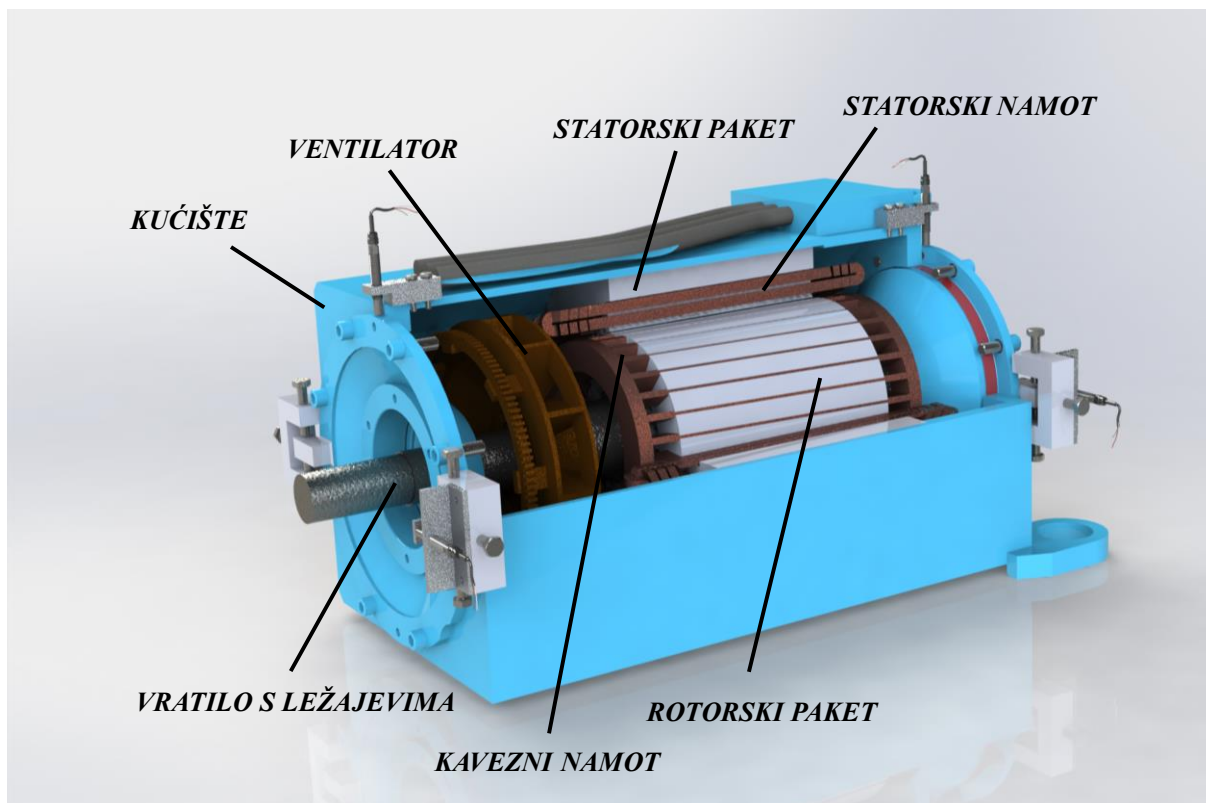


Slika 3.1 Tramvajski vučni motor

U eksploataciji, napajanje vučnog motora ostvareno je preko frekvencijskog pretvarača s IGBT tranzistorima. Motor je predviđen za napajanje s maksimalnim naponom 850 V i promjenjivom frekvencijom do 141 Hz, maksimalnom strujom 330 A te maksimalnom radnom brzinom iznosa  $4200 \text{ min}^{-1}$ . Motor je projektiran za nazivni napon od 320 V, frekvenciju 58 Hz te da na vratilu daje snagu od 65 kW. U tablici 3.1. prikazani su projektni podaci vučnog motora, a u tablici 3.2. geometrijske dimenzije utora statora i rotora u milimetrima. Mehanička zaštita motora je IP 20, a vrsta hlađenja IC01. Ventilator za hlađenje smješten je na osovini motora, a ulaz i izlaz zraka predviđen je preko odgovarajućih otvora smještenih s gornje strane te s bočne unutarnje strane motora. Motor ima dva izolirana kotrljajuća ležaja podmazivana mašću s mogućnošću domazivanja pomoću mazalica. Motor je izveden s dva kraja vratila. Pogonski kraj vratila namijenjen je za prijenos momenta preko elastične spojke i kardana, a suprotni konusni kraj namijenjen je za prijenos momenta kočenja preko kočionog diska hidraulične kočnice. U tramvaju, motor je smješten uzdužno i elastično ovješten preko odgovarajućih ušica. U statorskom namotu za potrebe praćenja zagrijavanja pri regulaciji brzine ugrađena su dva otpornička termometra Pt100. Motor ima tri jednožilna kabela tip H+S Radox 4GKW-AX EMC-L 50 mm<sup>2</sup>

1,8/3 kV, dužine 2,5 m za priključak na frekventni pretvarač te dva trožilna kabela s metalnim okriljem dužine 2,5 m za priključak termometara.

Na slici 3.2 je model motora s prikazom njegovih glavnih komponenti na kojima je moguća simulacija određene vrste kvara.



Slika 3.2 Model i presjek asinkronoga kaveznog motora s prikazom glavnih komponenti

Statorski namot je dvoslojni petljasti izveden od profilnih vodiča. Namot ukupno ima 36 svitaka smještenih u pripadajuće utore, a u svakom utoru je smješteno ukupno 6 vodiča (svakom sloju pripadaju 3 vodiča). Na slici 3.3 prikazan je utor statora motora s pripadajućim komponentama, a na slici 3.4 prikazana je razvijena shema statorskog namota.

Kavezni namot sastoji se od ukupno 28 neizoliranih profilnih štapova smještenih u pripadajuće utore. Model kaveznog namota prikazan je na slici 3.5 na kojoj su označene glavne komponente namota kao i mjesto na kavezu gdje je napravljen prekid jednog štapa i prekid prstena.

U svrhu provedbe specifičnih laboratorijskih mjerenja analizirani asinkroni motor je posebno doraden kako bi se njime moglo simulirati razne vrste kvarova. Kvarovi koje je moguće simulirati su:

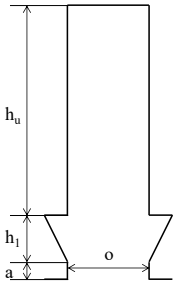
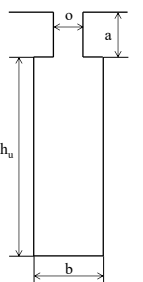
- međuzavojni kratki spoj statorskog namota,
- prekid štapa,
- prekid prstena,

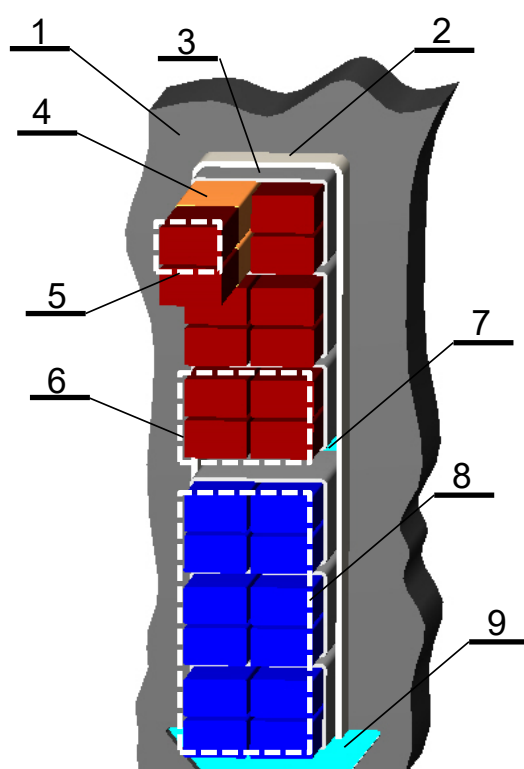
- ekscentričnost (statička),
- oštećenja ležaja.

Tablica 3.1 Projektni podaci asinkronog motora za pogon tramvaja

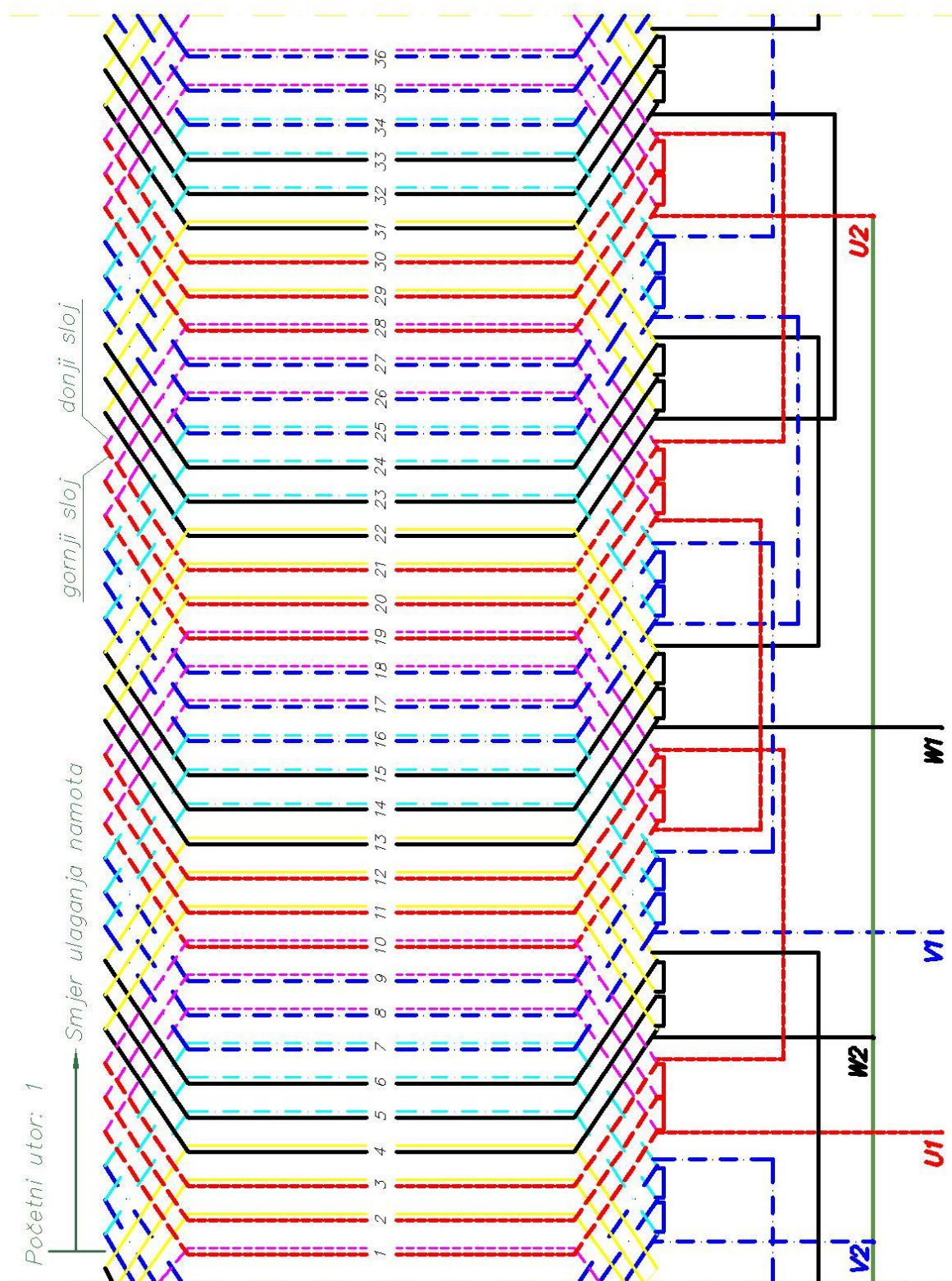
|                                             |                                |        |                                    |        |                         |                   |        |
|---------------------------------------------|--------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-------------------------|-------------------|--------|
| KONČAR<br>KONČAR - Generatori i motori d.d. |                                |        | PROJEKTNI PODACI ASINKRONOG STROJA |        |                         |                   |        |
|                                             |                                |        | 3 FAZNI KAVEZNI MOTOR              |        |                         |                   |        |
|                                             |                                |        | TIP: V6AOJ 205-04                  |        |                         |                   |        |
| U (V)                                       | spoj                           | P (kW) | n (min <sup>-1</sup> )             |        | I <sub>i</sub> (A)      | cosφ <sub>i</sub> | f (Hz) |
| 320                                         | Y                              | 65     | 1700                               |        | 151                     | 0.84              | 58     |
| 440                                         | Y                              | 65     | 2380                               |        | 113                     | 0.79              | 80     |
| 444                                         | Y                              | 65     | 4200                               |        | 104                     | 0.87              | 141    |
| 655                                         | Y                              |        | 4200                               |        | 300                     |                   |        |
| PROPISI: IEC 60349-2/2002                   |                                |        |                                    |        |                         | ZAGRIJANJE: 200K  |        |
|                                             |                                |        | STATOR                             |        |                         | ROTOR             |        |
| ŽELJEZO+RAD.KANALI                          |                                |        | 250                                |        |                         |                   |        |
| VANJSKI PROMJER                             |                                |        | 320                                |        | ZRAČNI<br>RASPOR<br>1.0 | 203               |        |
| UNUTARNJI PROMJER                           |                                |        | 205                                |        |                         | 70                |        |
| DINAMO LIM                                  |                                |        | V330-50A V15 IZ 2 3 0              |        |                         |                   |        |
| SKOŠENJE UTORA                              |                                |        |                                    |        |                         |                   |        |
| VRSTA NAMOTA                                |                                |        | DVOSLOJNI BAČVASTI                 |        |                         | KAVEZNI           |        |
| VRSTA IZOLACIJE/KL.                         |                                |        | POSEBNA/200                        |        | /                       | /                 |        |
| PAR. GRANE                                  | SPOJ FAZA                      |        | -                                  | Y      |                         |                   |        |
| PRIKRATA                                    | KORAK                          |        | 7/9                                | 1-8    |                         |                   |        |
| VODIČA U UTORU                              |                                |        | 2x3                                |        |                         | 1                 |        |
| NEIZOLIRANA<br>ŽICA                         | # ŽICA                         |        | 3.55x1.6                           | # 4    |                         | 6.5x25            |        |
| IZOLIRANA<br>ŽICA                           | IZOL.                          |        | 3.7x1.75                           | KAPTON |                         |                   |        |
| MATERIJAL / VODLJ.                          |                                |        | Ecu 58 F20 /58                     |        | /                       | RK D00051 /55     |        |
| BROJ UTORA                                  |                                |        | 36                                 |        |                         | 28                |        |
| BROJ SVITAKA                                |                                |        | 36                                 |        |                         |                   |        |
| DULJ. VODIČA                                | ISTAK                          |        | 515                                | 30     |                         | 310               | 30     |
| MASA<br>NAMOTA (kg)                         | R <sub>HL</sub> (Ω) PO<br>FAZI |        | 22.1                               | 0.0297 |                         | 12.4              |        |
| NAVLAKA                                     |                                |        |                                    |        |                         |                   |        |
| IZVODI                                      |                                |        | 50 mm <sup>2</sup> Cu              |        |                         |                   |        |
| KRATKOSPOJNI PRSTENI                        |                                |        | VANJSKI PR./RAD. X AKS.MJ.         |        | /                       | 200 / 15 x 30     |        |
|                                             |                                |        | MATERIJAL/MASA(kg)/VODLJ.          |        | /                       | Cu / 4.3 / 55     |        |

Tablica 3.2 Dimenzije i oblik statorskih i rotorskih utora

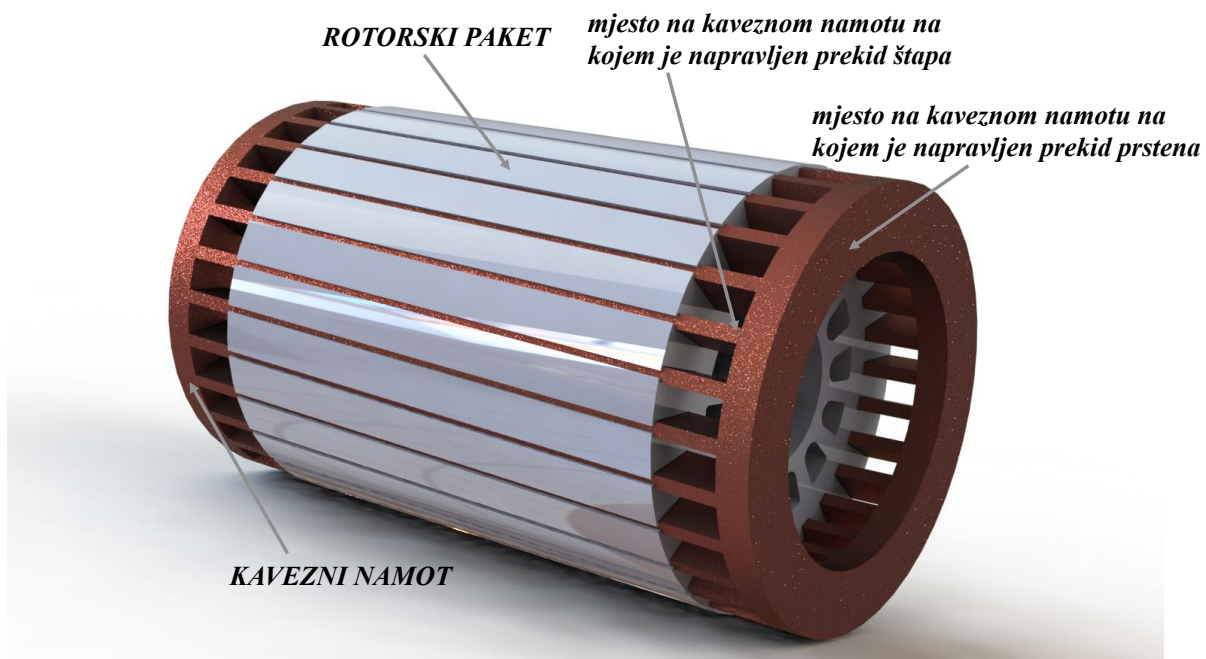
| 36 utora statora |      |                                                                                   | 28 utora rotora |      |                                                                                     |
|------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| oznaka           | [mm] |                                                                                   | oznaka          | [mm] |                                                                                     |
| $h_u$            | 27   |  | o               | 3    |  |
| $h_1$            | 2.5  |                                                                                   | a               | 1.5  |                                                                                     |
| a                | 0.5  |                                                                                   | b               | 6.8  |                                                                                     |
| o                | 9.5  |                                                                                   | $h_u$           | 25.3 |                                                                                     |



Slika 3.3 Utor statora motora s dvoslojnim namotom sa svicima izrađenim od profilne žice: 1 – statorski paket, 2 – utorski oblog, 3 – izolacija vodiča, 4 – izolacija dionog vodiča, 5 – dioni vodič, 6 – vodič, 7 – međuslojna izolacija, 8 – svitak namota, 9 – klin

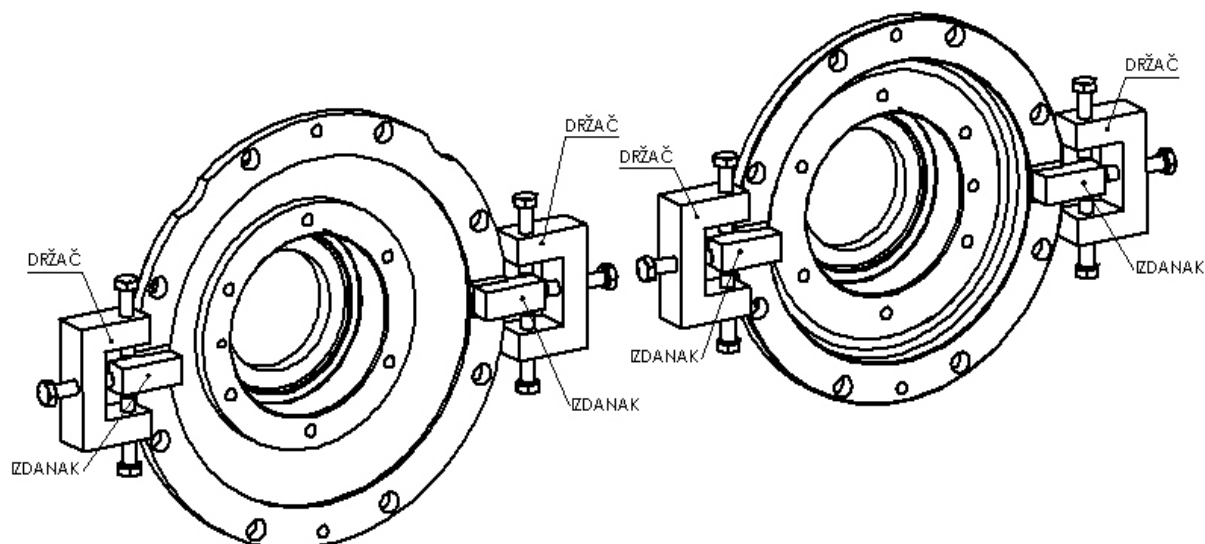


Slika 3.4 Shema namota statora



Slika 3.5 Izvedba kaveznog namota rotora pogodna za simuliranje oštećenja štapa i prstena

Za simulaciju prekida štapa i prstena na raspolaganju su dva identična kavezna rotora, na kojima je za potrebe mjerenja namjerno prvo prekinut jedan, a zatim i drugi štap kaveza te potom prsten kaveznog namota. Pomicanjem ležajnog štita asinkronog motora simulirat će se statički ekscentricitet, odnosno ostvarit će se pomak centra rotacije rotora motora. Simulacija ekscentriciteta omogućena je ležajnim štitovima posebno konstruiranim kako je prikazano na slici 3.6. Za definiranje nultog položaja (stanje bez ekscentriciteta), na štitovima su izrađeni tzv. prizoni. Prema nacrtu (slika 3.6), na ležajne štitove i kućište motora zavareni su potrebni nosači. Na nosačima se nalaze vijci s finim navojem koji omogućavaju simuliranje ekscentriciteta na zahtjev. Tako je moguće izazvati sljedeće vrste ekscentričnog pomaka: aksijalni, paralelni i dijametralni. Također je ovim načinom dorade omogućeno podešavanje stupnja ekscentriciteta od 0 – 100 % zračnog raspora.

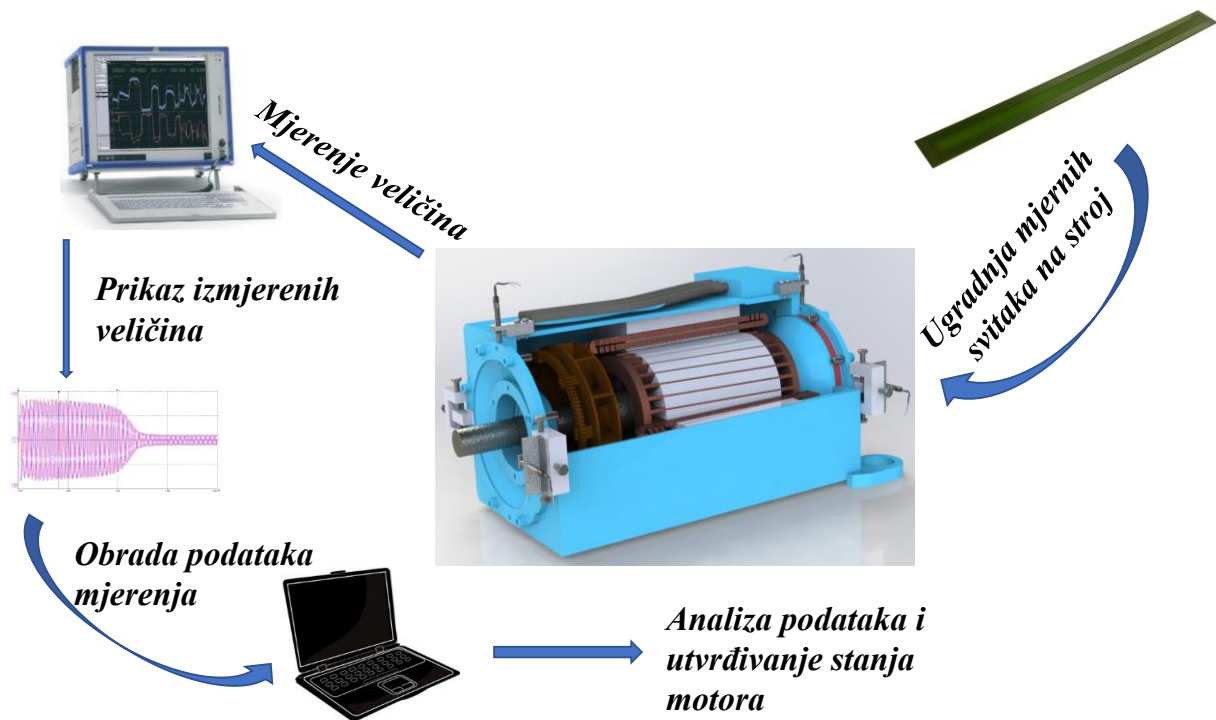


Slika 3.6 Ležajni štitovi konstruirani za simuliranje ekscentriciteta

### 3.2. Mjerna oprema

Za provedbu 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 3.7, koja je sastavljena od:

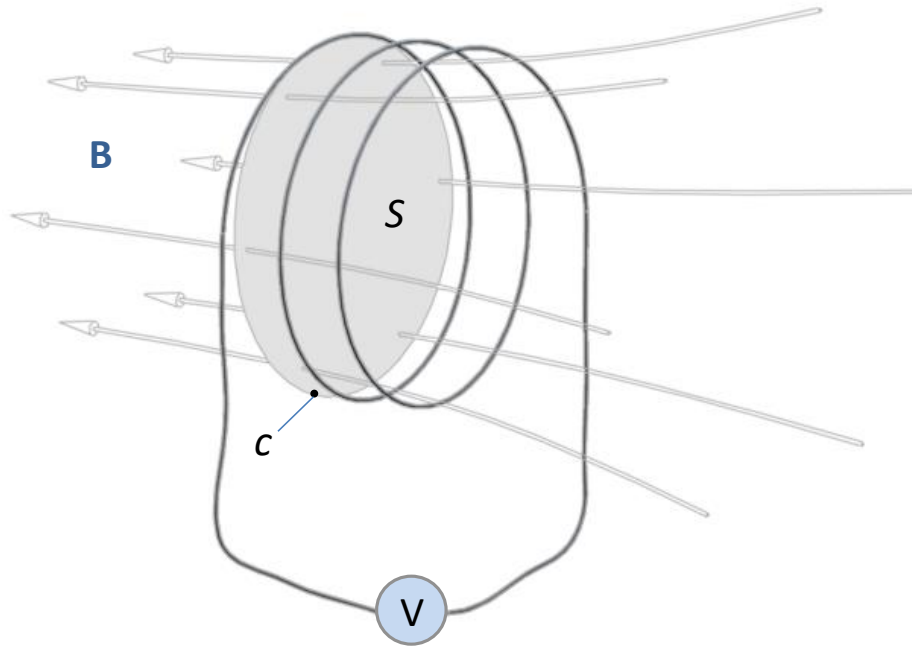
- objekta promatranja – asinkroni motor,
- mjernih senzora – mjerni svici i induktivni davači,
- mjerne laboratorijske stanice DEWETRON,
- prijenosa podataka mjerenja na računalo,
- obrade i analize izmjerenih veličina.



Slika 3.7 Principijelna shema mjernog sustava

### 3.2.1. Mjerni svitak

Senzori koji su korišteni za otkrivanje specifičnih vrsta kvarova su mjerni svici koji su ugrađeni u zračni raspor motora. Njima se mjeri napon koji se inducira u njima i to uslijed promjenjivog magnetskog toka kojeg taj svitak obuhvaća, slika 3.8. Zakon elektromagnetske indukcije kaže da je *inducirani napon u strujnom krugu jednak brzini kojom se mijenja magnetski tok ulančen strujnim krugom, a smjer inducirano napona je takav da protjera struje koje se protive promjeni toka* [91]. Napon induciran u ovakvom mjernom svitku koristi se potom u daljnjoj obradi i analizi sa svrhom otkrivanja pojedinoga specifičnog kvara motora.



Slika 3.8 Definicija elektromagnetske indukcije

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

$$u_{ind} = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.1)$$

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

$$u_{ind} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dB}{dt} \cdot S \quad (3.2)$$

za vremensku promjenu magnetske indukcije:

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

inducirani napon je:

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

Za petlju s  $N$  zavoja, odnosno svitak, inducirani napon jednak je:

$$u_{ind} = B_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot S \cdot N \quad (3.5)$$

Na slici 3.9 prikazana je izvedba mjernog svitka izrađenog u PCB tehnici (engl. *PCB – printed circuit board* ili tiskana pločica). Svici u PCB tehnici (mjerni svitak s točno određenim brojem zavoja utisnut je na tiskanu pločicu), koji su ugrađeni na objekt mjerenja, imaju geometrijske dimenzije koje odgovaraju dimenzijama statorskog zuba. Na svitak je utisnuto 5 zavoja kako bi naponska razina induciraniog napona u svitku bila dovoljne osjetljivosti za otkrivanje kvara. Geometrijske dimenzije svitka određuje po širini zub statora (8,34 mm), dok su debljina (0,24 mm) i duljina (125 mm) određene prema tehničkoj procjeni

koja je uzela u obzir mogućnost ugradnje svitka u odnosu na širinu zračnog raspora i duljinu statorskog paketa (tablica 3.1). Svici se na zub statora učvršćuju odgovarajućim dvokomponentnim ljepilom čime je u potpunosti osigurano da svici izdrže sva električna, termička i mehanička naprezanja.



Slika 3.9 Mjerni svitak izrađen u PCB tehnologiji

Primjer ugradnje mjernih svitaka na asinkroni kavezni motor prikazan je na slici 3.10. Svici se na zub statora ugrađuju prema principu za otkrivanje kvarova namota koji je opisan u sljedećem poglavlju, a temelji se na mjerenju magnetskog polja pomoću induciranog napona.



Slika 3.10 Mjerni svitak ugrađen na zub statora

### **3.2.2. Induktivni senzor**

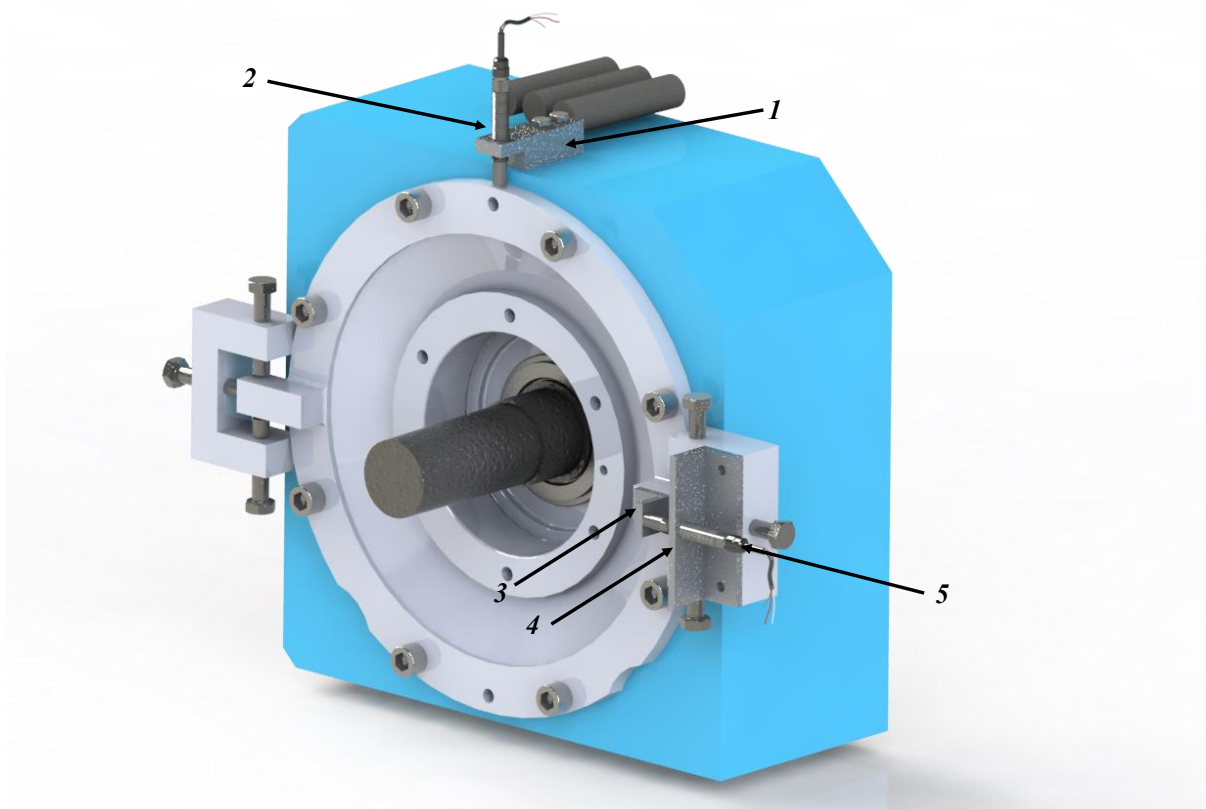
U ovom radu induktivni senzori koriste se kao pomoćni senzori kod mjerenja statičkog ekscentriciteta. Riječ je, u stvari, o senzorima relativnog pomaka koji detektiraju prisutnost feromagnetika u neposrednoj okolini. To im omogućuje jezgra sa zavojnicom i elektroničko sklopovlje koje detektira poremećaje polja koje stvara jezgra uslijed prisutnosti feromagnetika (slika 3.11). Izlaz iz ovakvog senzora može biti digitalni (0 ili 1) ili analogni (tipične

vrijednosti izlaza su 0 – 20 mA, 4 – 20 mA, 0 – 10 V, 2 – 10 V, 2 – 18 V...). Na tržištu su dostupne različite varijante ovih senzora.

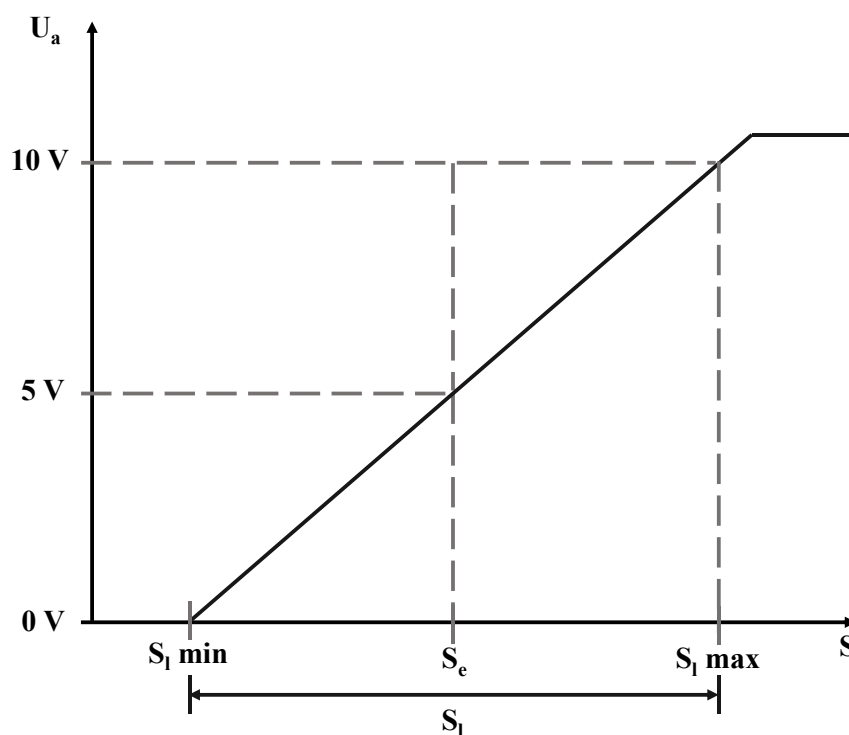


Slika 3.11 Induktivni senzor: 1 – jezgra sa zavojnicom, 2 – elektroničko sklopovlje

Upotrijebljeni su senzori tvrtke Balluff, model BAW M08EH-UAD15B-S04G. Senzori se koriste za mjerenje relativnog pomaka rotora motora (kod mjerenja ekscentriciteta) i to za dvije pozicije: jedan za mjerenje pomaka u  $x$  osi, a drugi za mjerenje pomaka u  $y$  osi (pozicije induktivnih senzora za mjerenja pomaka u  $x$  i  $y$  osi naznačene su na slici 3.12). Dobiveni izlazni naponski signali dovode se na ulaze mjernoga univerzalnog instrumenta te služe kao kontrola prilikom mjerenja iznosa ekscentriciteta, tj. koliko je pomaknut rotor motora u odnosu na centar rotacije. Mjerno područje ovih senzora je 1 mm (tj. opseg linearnosti je od 0,5 do 1,5 mm), a pokrivaju frekvencijsko područje do 1000 Hz te im se izlazni napon kreće od 0 do 10 V. Na slici 3.13 prikazana je njegova izlazna karakteristika. Oba senzora smještena su na kućište motora te je za realizaciju mjerenja bilo potrebno izraditi posebne nosače induktivnih senzora. Nosači su sastavljeni od dviju komponenti: glavnog nosača koji se ugrađuje na kućište motora, te pomoćnog nosača (feromagnetski dio za detekciju pomaka rotora) koji se ugrađuje na ležajni štit. Na slici 3.12 prikazana je izvedba nosača i njihova ugradnja na kućište motora. Induktivni senzor ima linearnu izlaznu karakteristiku, pri čemu je izlazni napon u ovisnosti o udaljenosti vrha senzora i metala. Ukoliko je metal izvan mjernog opsega senzora, senzor je u zasićenju, a izlazni napon je jednak gornjoj granici, odnosno iznosi 10 V. Približavanjem metala unutar mjernog opsega senzora, izlazni napon linearno opada s udaljenošću vrha senzora i metala. U ovom slučaju kad dođe do pomicanja ležajnog štita, a time i pomoćnog dijela nosača izlazni napon senzora će se promijeniti u određenom linearnom iznosu. Iznos izlaznog napona ovisi o udaljenosti vrha senzora od metala pomoćnog nosača. Kako bi se utvrdili referentni iznosi napona induktivnih senzora, prvo se provodi mjerenje kada nema prisutnog ekscentriciteta (tzv. referentno mjerenje), a tek onda ostala mjerenja različitih iznosa ekscentriciteta.



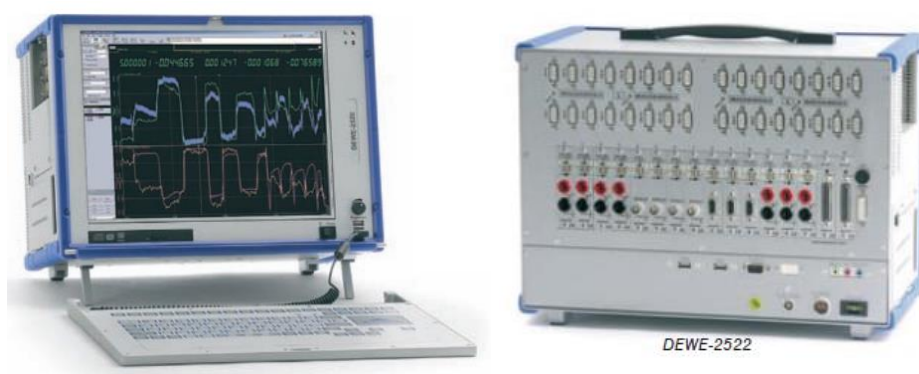
Slika 3.12 Prikaz ugradnje induktivnih senzora: 1 – nosač senzora za mjerenje u  $y$  – osi, 2 – induktivni senzor, 3 – pomoćni dio za mjerenje u  $x$  – osi, 4 – nosač senzora za mjerenje u  $x$  – osi, 5 – induktivni senzor



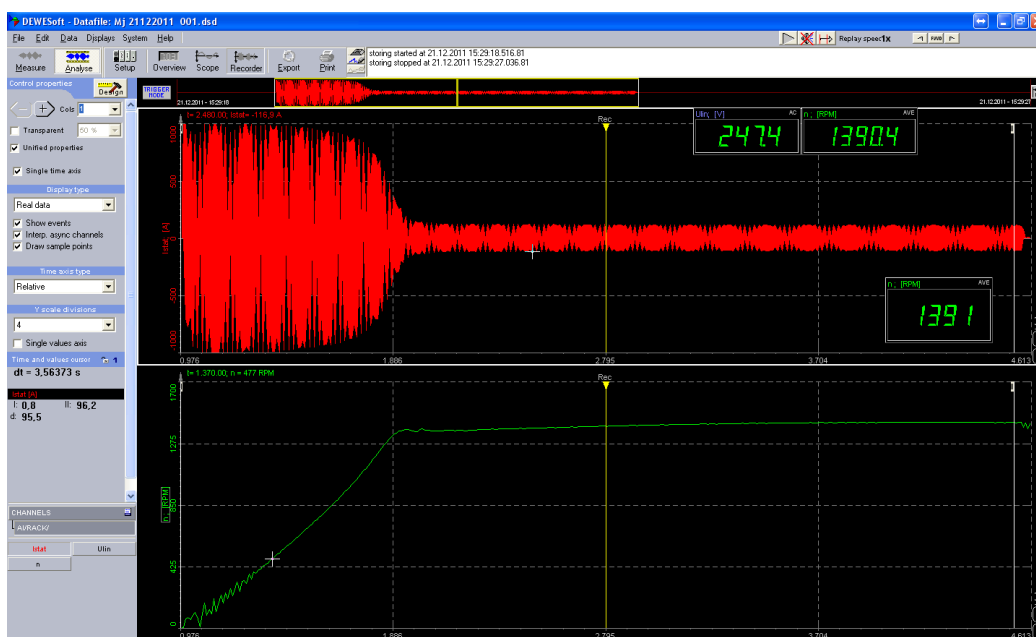
Slika 3.13 Izlazna karakteristika induktivnog senzora relativnog pomaka

### 3.2.3. Laboratorijska mjerna stanica

Laboratorijskom mjernom stanicom *DEWE 2522* snimani su parametri asinkronog motora: struja, napon, brzina vrtnje, naponi inducirani u mjernim svicima te naponski signali s induktivnih senzora. Proizvođač mjerne stanice je tvrtka *DEWETRON*. Na slici 3.14 prikazana je korištena mjerna stanica, a u tablici 3.3 vidljivi su njezini tehnički podaci preuzeti iz kataloga proizvođača. *DEWE 2522* je računalo koje podržava operativni sustav *Windows*. Ovo omogućuje dobru kompatibilnost s velikim brojem programskih alata, čime je omogućena lakša obrada i analiza mjerenih podataka. Također, *DEWE 2522* je prijenosni mjerni instrument namijenjen za akviziciju i obradu podataka dobivenih s mjernih uređaja i senzora ugrađenih ili spojenih na sam stroj. Praćenje, obrada i priprema izmjerenih podataka za daljnju analizu vrši se u programu *DEWESOFT*, čije programsko okruženje je prikazano na slici 3.15.



Slika 3.14 Mjerna laboratorijska stanica DEWE 2522



Slika 3.15 Programsko okruženje programa *DEWESOFT*

Tablica 3.3 Tehničke specifikacije mjerne stanice 2522 preuzete iz kataloga proizvođača

| Ulazne karakteristike                                                                              | DEWE 2522                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Utori za DAQ i PAD module                                                                          | 16                                                                                                       |
| MDAQ ulazni kanali                                                                                 | do 32                                                                                                    |
| <b>Glavni sustav</b>                                                                               |                                                                                                          |
| Ukupno PCI utora                                                                                   | 3 za karticu cijele duljine/1 za karticu od pola duljine                                                 |
| Težina                                                                                             | 14.5 kg                                                                                                  |
| Tvrđi disk                                                                                         | 250 GB                                                                                                   |
| Protok podataka                                                                                    | 30 to 45 MB/s                                                                                            |
| Napajanje                                                                                          | Baterijsko napajanje, vanjsko AC napajanje 100 do 240 VAC, vanjsko DC napajanje 9 do 36 VDC (opcionalno) |
| Zaslon                                                                                             | 15" TFT zaslon, 1024x768 piksela                                                                         |
| Procesor                                                                                           | Intel® Pentium® M (1.8 GHz)                                                                              |
| RAM                                                                                                | 1 GB                                                                                                     |
| Ethernet                                                                                           | 10/100/1000 BaseT                                                                                        |
| USB sučelje                                                                                        | 2                                                                                                        |
| RS-232 sučelje                                                                                     | 1                                                                                                        |
| Disk za pohranu                                                                                    | Vlastiti DVD +/-RW snimač                                                                                |
| Operacijski sustav                                                                                 | Microsoft® WINDOWS® XP Professional                                                                      |
| Dimenzije (ŠxDxV)                                                                                  | 409 x 240 x 291 mm                                                                                       |
| <b>Uvjeti okoline</b>                                                                              |                                                                                                          |
| Radna temperatura:<br>kod pražnjenja baterija<br>kod punjenja baterija<br>Kad su baterije izvađene | 0 do +50 °C<br>0 do +45 °C<br>-5 do +50 °C                                                               |
| Temperatura skladištenja                                                                           | -20 do +60 °C                                                                                            |
| Vlažnost                                                                                           | 10 do 80 % nekond., 5 do 95 % rel. vlažnost                                                              |
| Vibracija                                                                                          | MIL-STD 810F 514.5, procedura I                                                                          |
| Udar                                                                                               | MIL-STD 810F 516.5, procedura I                                                                          |
| <b>Opcije sustava</b>                                                                              |                                                                                                          |
| Opcija                                                                                             | Opis                                                                                                     |
| DEWE-DCDC-24-300-ISO                                                                               | Vanjski DC/DC pretvarač s izolacijom, raspon ulaz 9-36 VDC, opcija 24 VDC izlaz, 300 W                   |
| BAT-95WH                                                                                           | Lithium-Ion baterija, 14.4 V, 95 Wh, max. 8 A                                                            |
| BAT-CHARGER                                                                                        | Desktop punjač baterije, uklj. vanjski AC adapter                                                        |
| DISP-15-TOUCH                                                                                      | 15" zaslon osjetljiv na dodir (potrebno jedno USB sučelje)                                               |

### **3.2.4. Mjerna nesigurnost**

Mjerna nesigurnost u širem smislu znači sumnju u valjanost mjernog rezultata, a definira se kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Budući da se u disertaciji provode eksperimentalna mjerenja prilikom kojih se koriste mjerni uređaji te se u konačnici želi potvrditi i verificirati 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 laboratorijske stanice DEWETRON,
- točnost univerzalnoga mjernog instrumenta,
- nesavršenost prilikom ugradnje mjernih svitaka na statorski paket motora,
- dopuštena tolerancija u nesimetriji zračnog rasporeda,
- nesavršenost i tolerancije u izradi strojeva,
- pogreška ponovljivosti mjerenja – mjerenje induciranih napona u mjernim svicima,
- pogreška ponovljivosti mjerenja – mjerenje relativnog pomaka ležajnog štita pomoću induktivnih senzora.

Postupak određivanja mjerne nesigurnosti proveden je prema izrazima i postupku koji se može pronaći u relevantnoj literaturi [92, 93]. Prvo je određena mjerna nesigurnost mjernih uređaja, a potom i ukupna nesigurnost mjerenja. U tablici 3.4 prikazana je mjerna nesigurnost dobivena za mjernu laboratorijsku stanicu. Greška instrumenta i procijenjena nestabilnost izvora određeni su iz službene umjerenice mjerne stanice, dok je doprinos ponovljivosti mjerenja određen na osnovu izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima dobivenim za ispravno stanje (rotor pozicioniran u centru). Na osnovu svih doprinosa određena je mjerna nesigurnost laboratorijske mjerne stanice u iznosu od  $\pm 2,4$  %.

Tablica 3.4 Mjerna nesigurnost mjerne stanice

| Doprinos                                                      | Maksimalna greška | Razdioba                 | Standardna devijacija | Koeficijent osjetljivosti | Mjerna nesigurnost |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Ponovljivost mjerenja (mjerni svici)                          | $\pm 4,77 \%$     | normalna, $k=2$          | $\pm 2,38 \%$         | 1                         | $\pm 2,38 \%$      |
| Greška instrumenta (AC napon)                                 | $\pm 0,12 \%$     | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $\pm 0,07 \%$         | 1                         | $\pm 0,07 \%$      |
| Nestabilnost izvora                                           | $0,5 \%$          | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $0,3 \%$              | 1                         | $0,3 \%$           |
| $\sum MJ.STAN. = \sqrt{2,38^2 + 0,07^2 + 0,3^2} = \pm 2,4 \%$ |                   |                          |                       |                           |                    |

U tablici 3.5 prikazana je mjerna nesigurnost dobivena za univerzalni instrument. Greška instrumenta i procjenjena nestabilnost izvora određeni su iz službene umjerenice univerzalnog instrumenta, dok je doprinos ponovljivosti mjerenja određen na osnovu izmjerenih napona koji su dobiveni s induktivnih senzora postavljenih na kućište motora (ležajni štit pozicioniran u centru). Na osnovu svih prikazanih doprinosa određena je mjerna nesigurnost univerzalnog instrumenta u iznosu od  $\pm 3,07 \%$ .

Tablica 3.5 Mjerna nesigurnost univerzalnog instrumenta

| Doprinos                                                           | Maksimalna greška | Razdioba                 | Standardna devijacija | Koeficijent osjetljivosti | Mjerna nesigurnost |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Ponovljivost mjerenja (induktivni senzori)                         | $\pm 6,13 \%$     | normalna, $k=2$          | $\pm 3,06 \%$         | 1                         | $\pm 3,06 \%$      |
| Greška instrumenta (DC napon)                                      | $\pm 0,06 \%$     | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $\pm 0,035 \%$        | 1                         | $\pm 0,035 \%$     |
| Nestabilnost izvora                                                | $0,5 \%$          | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $0,3 \%$              | 1                         | $0,3 \%$           |
| $\sum UNIV.INSTR. = \sqrt{3,06^2 + 0,035^2 + 0,3^2} = \pm 3,07 \%$ |                   |                          |                       |                           |                    |

U tablici 3.6 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 osnovu geometrijskih dimenzija mjernog svitka i mjesta ugradnje (zub statora). Utjecaj dopuštene tolerancije nesimetrije zračnog raspora uzet je iz dostupnih istraživanja, a tolerancije u izradi statorskog paketa, preuzet je iz dostupnih konstrukcijskih podataka o limu statora. Na osnovi svih prikazanih faktora određena je konačna ukupna mjerna nesigurnost eksperimentalnog mjerenja u iznosu od  $\pm 8,87 \%$ . Ukoliko se cijeli postupak želi izraziti kao 95 % točnosti izračuna tada je krajnji rezultat odnosno ukupnu mjernu nesigurnost potrebno proširiti s  $k = 2$ . Dakle mjerna nesigurnost postupka tada iznosi  $\pm 17,74 \%$ .

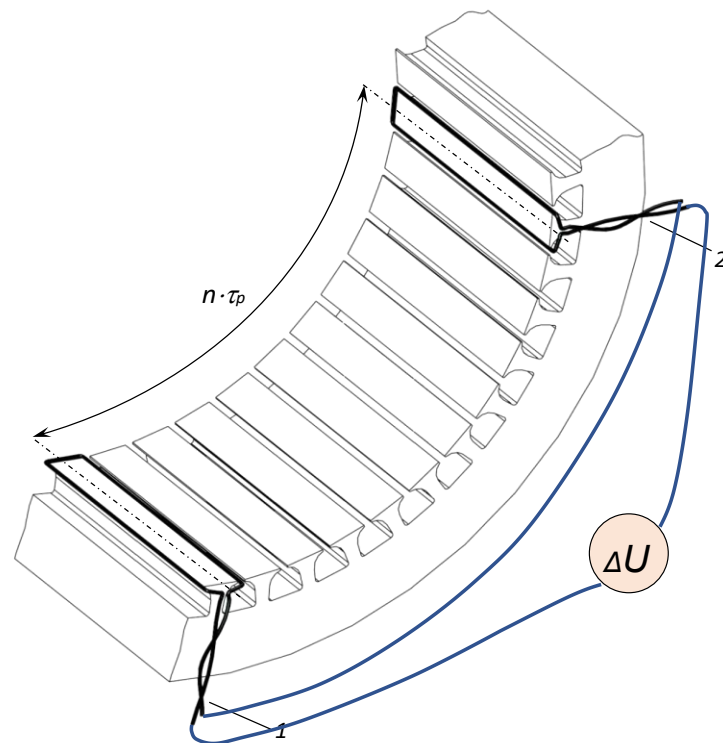
Tablica 3.6 Mjerna nesigurnost cjelokupnoga eksperimentalnog mjerenja

| Faktor                                                                                    | Maksimalna greška | Razdioba        | Standardna devijacija | Koeficijent osjetljivosti | Mjerna nesigurnost |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Mjerna stanica                                                                            | $\pm 2,40 \%$     | normalna, $k=1$ | $\pm 2,40 \%$         | 1                         | $\pm 2,40 \%$      |
| Univerzalni instrument                                                                    | $\pm 3,07 \%$     | normalna, $k=1$ | $\pm 3,07 \%$         | 1                         | $\pm 3,07 \%$      |
| Nesavršenost ugradnje svitka - uzdužno                                                    | $\pm 1,60 \%$     | normalna, $k=1$ | $\pm 1,60 \%$         | 1                         | $\pm 1,60 \%$      |
| Nesavršenost ugradnje svitka - poprijeko                                                  | $\pm 6,00 \%$     | normalna, $k=1$ | $\pm 6,00 \%$         | 1                         | $\pm 6,00 \%$      |
| Tolerancija nesimetrije zračnog raspora                                                   | $10,00 \%$        | normalna, $k=2$ | $5,00 \%$             | 1                         | $5,00 \%$          |
| Tolerancija izrade statorskog paketa                                                      | $0,07 \%$         | normalna, $k=1$ | $0,07 \%$             | 1                         | $0,07 \%$          |
| $\sum UK_{MU} = \sqrt{2,40^2 + 3,07^2 + 1,60^2 + 6,00^2 + 5,00^2 + 0,07^2} = \pm 8,87 \%$ |                   |                 |                       |                           |                    |
| $\sum MU_{POSTUPAK} = \sum UK_{MU} \times 2 = \pm 8,87 \% \times 2 = \pm 17,74 \%$        |                   |                 |                       |                           |                    |

#### **4. Mjerenje magnetskog polja pomoću induciranog napona u mjernim svicima**

U sklopu razvojno – istraživačkih aktivnosti na području monitoringa asinkronih motora u ovom poglavlju je prikazan princip metode za otkrivanje puknuća štapa rotora asinkronoga kaveznog motora. Njezino rješenje je zaštićeno patentom i intelektualno je vlasništvo KONČAR – Instituta za elektrotehniku [6]. Tehnički problem koji se rješava ovom metodom je pouzdano i točno otkrivanje međuzavoynih kratkih spojeva statorskog i rotorskog namota sinkronih strojeva te kliznokolutnih asinkronih strojeva, ali i puknuće jednog ili više štapova te prstena kaveza rotora kod asinkronih kaveznih strojeva. Budući da uslijed električnih, mehaničkih i toplinskih naprezanja dolazi do oštećenja namota izmjeničnih strojeva, potvrđeno je da se takva oštećenja pouzdano mogu otkriti kontinuiranim praćenjem magnetskog polja u i izvan zračnog raspora [8, 26, 27, 28, 29, 30, 79, 80, 90]. Stoga ugradnja mjernih svitaka oko zuba statora ili Hallovih senzora u zračni raspor ili mjernih svitaka za mjerenje rasipnih magnetskih polja izvan stroja omogućava otkrivanje oštećenja rotorskog namota.

*Nova metoda za otkrivanje oštećenja rotorskog namota temelji se na diferencijalnom mjerenju magnetskog polja u zračnom rasporu pomoću dva serijski spojena mjerna svitka ugrađena oko zuba statorskog paketa. Slika 4.1 prikazuje način ugradnje mjernih svitaka na električni izmjenični rotacijski stroj. U nastavku je ukratko opisana sama metoda, njezino korištenje i metodologija ugradnje mjernih svitaka na izmjenični rotacijski stroj.*



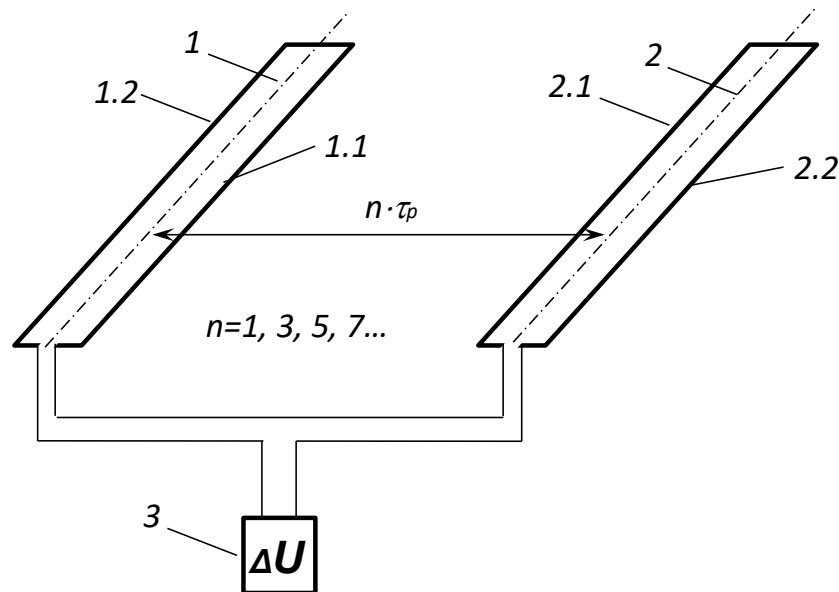
Slika 4.1 Princip i način ugradnje mjernih svitaka za diferencijalno mjerenje magnetskog polja na električni izmjenični rotacijski stroj [6]

Prvi mjerni svitak (1) ugrađuje se na proizvoljno odabrani zub statora, a drugi mjerni svitak (2) ugrađen je na zub statora koji po apsolutnom iznosu ima jednak ulančeni magnetski tok kao zub statora na koji je ugrađen prvi svitak (1) od kojeg je udaljen za iznos  $n \cdot \tau_p$ , gdje je  $\tau_p$  polni korak, a  $n=1,2,3,4,5,\dots$  njegov višekratnik. Mjerni svici (1) i (2) ugrađuju se na zub statora, jer je tada strogo definirana površina kroz koju se mjeri inducirani napon. Kod ovog načina ugradnje, površina na kojoj se mjeri magnetsko polje, jednaka je za oba mjerna svitka što je ključno za diferencijalnu metodu mjerenja. Mjerne svitke (1) i (2) potrebno je ugraditi na mjesta u stroju koja po apsolutnom iznosu imaju jednak ulančeni magnetski tok. Da bi se ispunio ovaj uvjet i ostvarila mjerna metoda prema izumu [6], potrebno je mjerne svitke (1) i (2) međusobno serijski spojiti u protuspoj, u zavisnosti od parnosti višekratnika polnog koraka  $\tau_p$ . Način spajanja dvaju mjernih svitaka u odgovarajući serijski protuspoj prikazan je na slikama 4.2 i 4.3.

U istraživanjima koja su provedena u sklopu disertacije ne primjenjuje se direktno sama metoda i serijsko spajanje svitaka u protuspoj, već naponi koji se induciraju u mjernim svicima te se potom koriste u daljnjoj obradi signala na način da se u programu za otkrivanje prekida kaveza (faza obrade podataka) primjenjuje metoda oduzimanja napona u zavisnosti o parnosti višekratnika polnog koraka. Također ako bi se u detekciji kvarova kaveznog rotora primjenila

samo metoda diferencijalnog mjerenja magnetskog polja, napon dobiven primjenom iste ne bi bio upotrebljiv za pouzdanu i točnu detekciju statičkog ekscentriciteta rotora. U slučaju detekcije ekscentriciteta nužno je u obradi podataka korištenje induciranog napona u samim svicima, a ne razlika napona koja se dobiva diferencijalnom metodom.

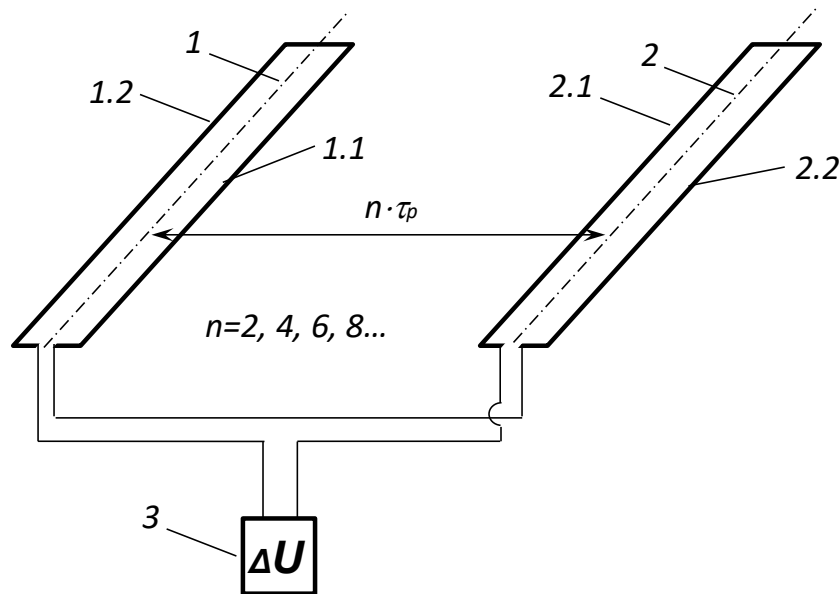
U slučaju da je za međusobnu udaljenost mjernih svitaka 1 i 2 odabran neparan višekratnik  $n = 1, 3, 5, 7...$  polnog koraka  $\tau_p$ , tada je mjerne svitke 1 i 2 potrebno spojiti u protuspoj kako je prikazano na slici 4.2. Unutrašnja strana 1.1 svitka 1 spaja se s unutrašnjom stranom 2.1 svitka 2. Vanjska strana 1.2 svitka 1 i vanjska strana 2.2 svitka 2, spajaju se na mjerni član (3) koji mjeri ukupni napon  $\Delta U$  koji se inducira u dva serijski spojena mjerna svitka 1 i 2, odnosno razliku napona. Ovako serijski spojeni mjerni svici 1 i 2 čija je međusobna udaljenost neparan višekratnik  $n = 1, 3, 5, 7...$  polnog koraka  $\tau_p$  imat će u ispravnom stanju stroja, jednak ulančeni magnetski tok, ali će smjer magnetskih silnica biti različit. Ovako spojeni i ugrađeni mjerni svici omogućuju međusobno oduzimanje napona koji se induciraju u mjernim svicima 1 i 2.



Slika 4.2 Način spajanja mjernih svitaka čija je međusobna udaljenost neparni višekratnik polnog koraka

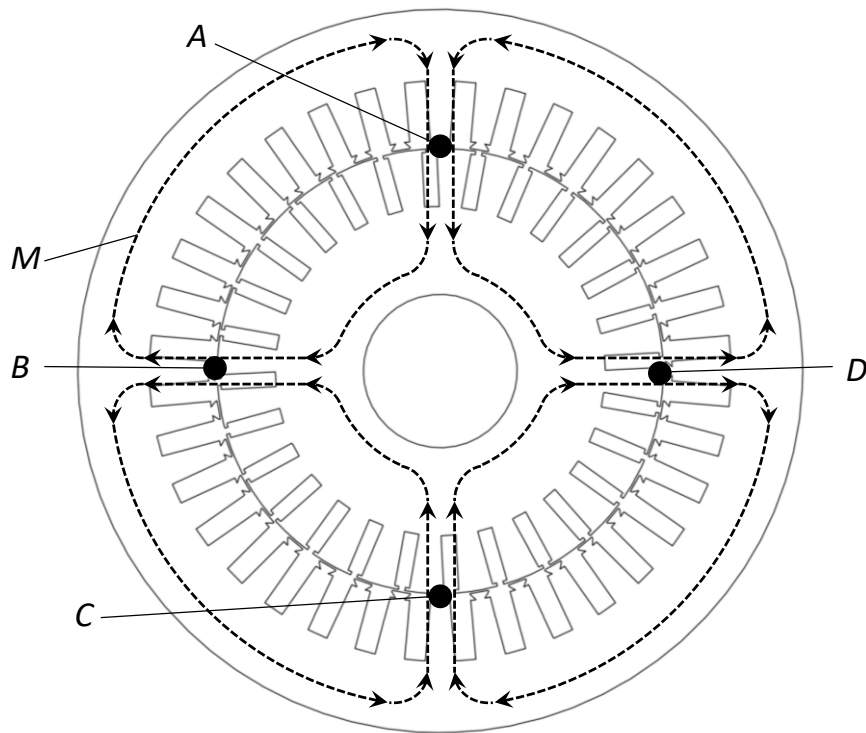
U slučaju da je za međusobnu udaljenost mjernih svitaka 1 i 2 odabran parni višekratnik  $n = 2, 4, 6, 8...$  polnog koraka  $\tau_p$ , tada je mjerne svitke 1 i 2 potrebno spojiti u protuspoj kako je prikazano na slici 4.3. Unutrašnja strana 1.1 svitka 1 spaja se s vanjskom stranom 2.2 svitka 2. Vanjska strana 1.2 svitka 1 i unutrašnja strana 2.1 svitka 2, spajaju se na mjerni član (3) koji mjeri ukupni napon  $\Delta U$  koji se inducira u dva serijski spojena mjerna svitka 1 i 2, odnosno razliku napona. Ovako serijski spojeni mjerni svici 1 i 2 čija je međusobna udaljenost parni

višekratnik  $n = 2, 4, 6, 8...$  polnog koraka  $\tau_p$  imat će, jednak ulančeni magnetski tok i jednak smjer magnetskih silnica. Ovako spojeni i ugrađeni mjerni svici omogućuju međusobno oduzimanje napona koji se induciraju u mjernim svicima 1 i 2.



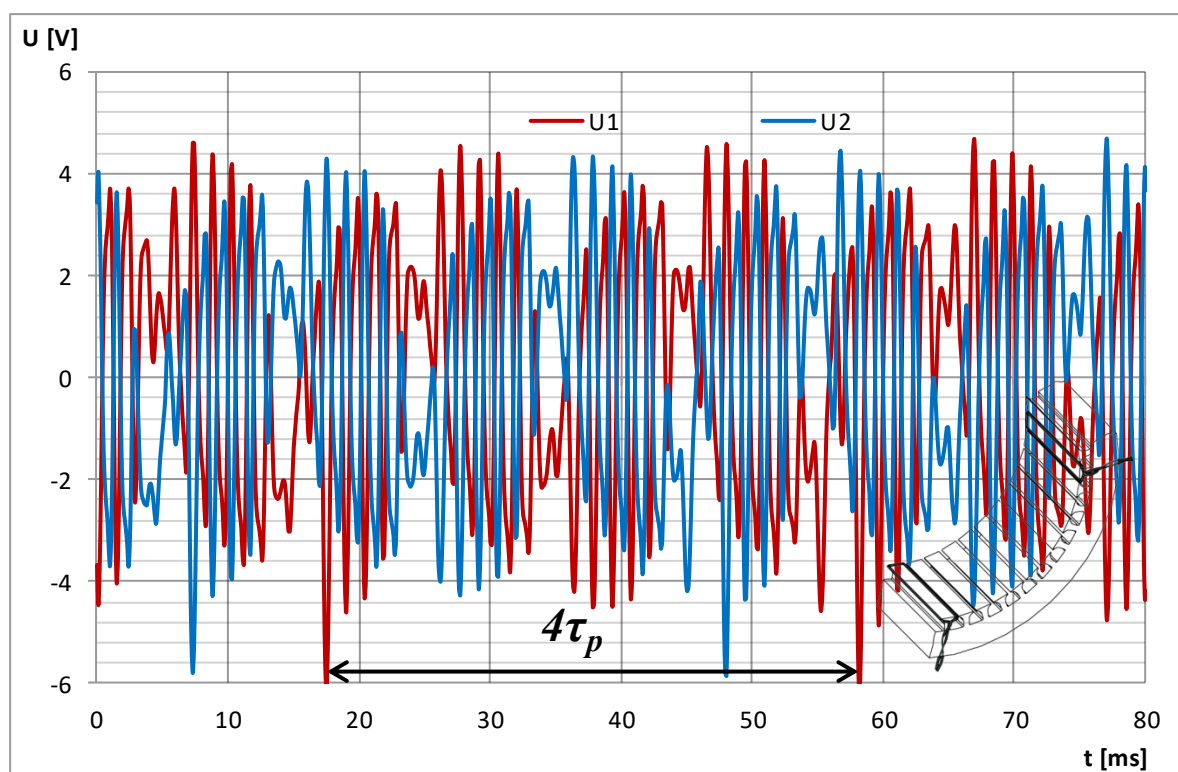
Slika 4.3 Način spajanja mjernih svitaka čija je međusobna udaljenost parni višekratnik polnog koraka

Za lakše razumijevanje problematike spajanja svitaka u ovisnosti o parnosti višekratnika polnog koraka, na slici 4.4 prikazan je primjer raspodjele silnica magnetskog polja za četveropolni asinkroni motor. Mjesta za ugradnju mjernih svitaka u četveropolnom stroju, međusobno udaljena za višekratnik polnog koraka  $n \cdot \tau_p$ , gdje je  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7...$ , prikazana na slici 4.4 i označena pozicijama A, B, C, i D imaju, za odabrani trenutak promatranja, po apsolutnom iznosu jednak ulančeni magnetski tok. Međutim smjer linija M magnetskog polja, na promatranim pozicijama nije isti, već se razlikuje na pozicijama A i C u odnosu na pozicije B i D. Na pozicijama A i C magnetske linije M imaju smjer od periferije stroja prema centru, dok na pozicijama B i D imaju smjer od centra stroja prema njegovoj periferiji. Ako se prilikom ugradnje mjernih svitaka u stroj za međusobnu udaljenost mjernih svitaka odabere polni korak  $\tau_p$  ili neparni višekratnik polnog koraka  $\tau_p$ , tada je mjerne svitke 1 i 2 potrebno ugraditi na pozicije A i B ili A i D ili C i B ili C i D te ih spojiti prema slici 4.2. Ako se prilikom ugradnje mjernih svitaka u stroj za međusobnu udaljenost mjernih svitaka odabere parni višekratnik polnog koraka  $\tau_p$ , tada je mjerne svitke 1 i 2 potrebno ugraditi na pozicije A i C ili B i D te ih spojiti prema slici 4.3.

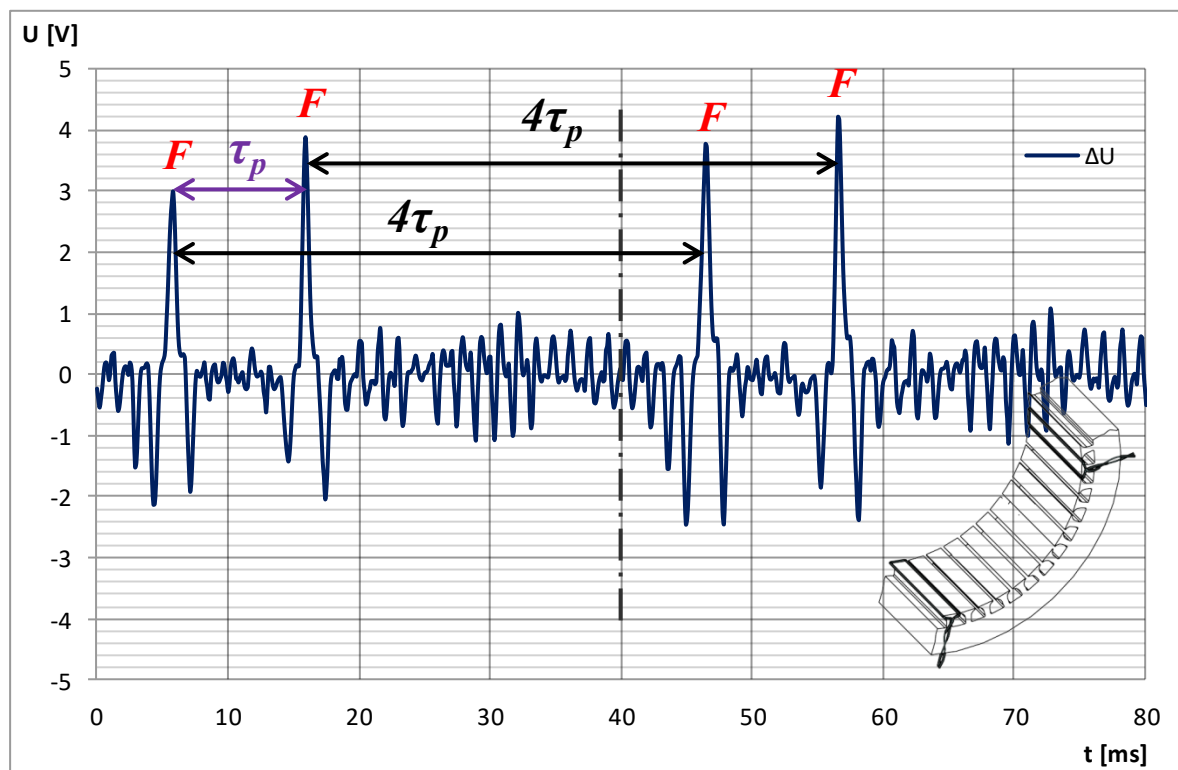


Slika 4.4 Raspodjela magnetskog polja u četveropolnom rotacijskom izmjeničnom stroju

Na slici 4.5 prikazani su dijagrami valnih oblika napona  $U_1$  i  $U_2$  izmjerenih na krajevima svakog od mjernih svitaka zasebno, uz prekinut jedan štap rotorskog kaveza asinkronog motora. Valni oblik napona koji se inducira u mjernom svitku ima jednak oblik za mjerni svitak 1 i za mjerni svitak 2. Na slici 4.5 može se uočiti da su odstupanja između krivulja vrlo mala. Valni oblici napona prikazani na slici 4.5 su periodični i ponavljaju se za svaki okret stroja koji odgovara vremenu 40 ms odnosno 4 polna koraka ( $4\tau_p$ ). Na slici 4.6 prikazan je dijagram valnog oblika napona  $\Delta U$  izmjerenog na krajevima dva mjerna svitka spojena u protuspoj, uz prekinut jedan štap kaveza. Otkrivanje kvara namota rotora iz valnog oblika napona  $U_1$  ili  $U_2$  koji se inducira u mjernom svitku, a prikazanog na slici 4.5, zahtijeva složenu obradu signala ukoliko se koristi samo jedan mjerni svitak. Međutim ukoliko se promatra valni oblik napona  $\Delta U$  prikazan na slici 4.6 i koji se dobiva ako se dva mjerna svitka spoje u protuspoj, može se zaključiti da je kvar namota rotora jednostavno otkriti. Spajanjem dva mjerna svitka u ovakav spoj poništava se djelovanje magnetskog polja ispravnog stroja tako da dva mjerna svitka mjere samo magnetsko polje koje je uzrokovano kvarom namota rotora. Na slici 4.6, oštećenje namota označeno je pozicijama  $F$ , koje se ponavljaju dva puta tijekom jednoga punog okreta za slučaj jednoga prekinutog štapa kaveza rotora.



Slika 4.5 Valni oblik napona izmjeren na krajevima svakog od mjernih svitaka zasebno, uz prekinut jedan štap rotorskog kaveza



Slika 4.6 Valni oblik napona izmjeren na krajevima dva serijski spojena mjerna svitka, uz prekinut jedan štap kaveza motora

Oštećeni dio namota odnosno prekinuti štap kaveza, tijekom jednog okreta stroja, nailazi na mjerni svitak 1 i na mjerni svitak 2. Stoga su i u mjerenom valnom obliku prisutna dva izrazito visoka iznosa napona tijekom jednog okreta stroja, označena pozicijama  $F$  na slici 4.6. Na slici su vidljiva 4 visoka iznosa napona označena pozicijama  $F$  jer su prikazana dva puna okreta stroja. Prema tome, broj takvih nadvišenja mjerenog napona tijekom jednog punog okreta stroja, podijeljen s brojem dva, daje broj oštećenja namota rotora. Na slici 4.6, može se uočiti da se iznos nadvišenja napona dva mjerna svitka spojena u protuspoj, uzrokovan oštećenjem jednog štapa rotorskog kaveza, kreće od 3 V do 4 V, što predstavlja dovoljan iznos za pouzdano otkrivanje kvara te stoga nema potrebe za pojačalima mjerenog signala. Ova metoda može se pored otkrivanja kvara namota rotora koristiti i za utvrđivanje broja oštećenih štapova kaveza, a isto tako i za određivanje njihovoga međusobnog položaja. Na slici 4.6 može se uočiti da napon  $\Delta U$  dva mjerna svitka, za onaj dio rotora na kojem nema oštećenja namota, nije jednak nuli. Razlog tome su dopuštene tolerancije u izradi i montaži stroja te nesavršenosti ugradnje mjernih svitaka. Međutim jasno se može uočiti promjena iznosa mjerenog napona u slučaju oštećenja namota rotora.

Na slici 4.7 prikazana je ugradnja mjernih svitaka prema metodi na jedan tip asinkronog motora. Svici izvedeni u PCB tehnici ugrađuju se na zube statora i međusobno su pomaknuti za polni korak motora.



Slika 4.7 Mjerni svici za diferencijalno mjerenje magnetskog polja ugrađeni na zube statora asinkronog motora

Primjena inovativne metode je prvenstveno u području monitoringa i dijagnostike rotacijskih strojeva te pored otkrivanja kvara namota rotora može se primijeniti i za otkrivanje broja prekinutih štapova kaveznog rotora. Putem analognog ulaza i uobičajene mjerne opreme, vrši se uzorkovanje napona dva serijski spojena mjerna svitka. Zahtjevi na analogni ulaz su: frekvencija uzorkovanja 10 kHz ili više, naponska razina  $\pm 10$  V za mjerne svitke s jednim do pet zavoja. Mjerenjem iznosa napona i brojanjem prekoračenja mjerenog napona u odnosu na referentnu podešenu vrijednost tijekom jednog okreta stroja te dijeljenjem tog broja s brojem dva, moguće je ustanoviti i broj oštećenih štapova. Osnovna prednost ove metode je ta da mjerenjem napona dva serijski spojena mjerna svitka, u vremenskoj domeni, bez dodatne obrade mjerenog signala, može otkriti prekid kaveznog namota rotora kod asinkronih strojeva. Za potpunu funkcionalnost i primjenjivost metode optimalno bi bilo ugraditi mjerne svitke u motor tokom same proizvodnje ili redovitog remonta, kada je motor u ispravnom stanju. U odnosu na ovu diferencijalnu metodu, u sklopu disertacije je bilo nužno za otkrivanje kvarova rotora motora primijeniti metodologiju koja se temelji na ugradnji i korištenju najmanje četiri mjerna svitka koji su prostorno razmaknuti za polni korak s time da je izbjegnuto spajanje svitaka u protuspoj. Napon koji se inducira u mjernim svicima potom se obrađuje i analizira te koristi za otkrivanje kvarova rotora: prekid jednog ili više štapova, prekid prstena te statički ekscentricitet. Rezultati istraživanja dobiveni proračunima i mjerenjima, a temeljeni na induciranim naponima prikazani su u sljedećim poglavljima disertacije.

## **5. Elektromagnetski proračun motora metodom konačnih elemenata**

Prilikom dimenzioniranja magnetskih i električnih krugova električnih strojeva najčešće se primjenjuju standardni analitički proračuni koji se zasnivaju na dvije osnovne pretpostavke: linearnosti i simetričnosti. Međutim, točnije određivanje karakteristika i ponašanja stroja jedino je moguće odrediti 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 specifične analize problema stroja koje nije moguće ispitati u stvarnosti u laboratorijskim uvjetima. Najrasprostranjenija takva numerička metoda koja svoju konkretnu primjenu ima u analizi rotacijskih električnih strojeva je metoda konačnih elemenata (MKE). Navedena metoda se može primijeniti u rješavanju dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih problema elektromagnetskih polja, a rješenja se mogu dobiti za statičke, vremenski promjenjive i prijelazne pojave. U slučaju primjene MKE-a u analizi elektromagnetskih prilika električnih strojeva, posebna pozornost se obraća na što točnije podatke o elektromagnetskim značajkama materijala strukturnih dijelova (aktivni dio stroja), kao i na dimenzioniranje i generiranje mreže konačnih elemenata. Budući da je većina magnetske energije pohranjena u zračnom rasporu odnosno cjelokupna pretvorba energije (električna u mehaničku i obrnuto) se odvija u zračnom rasporu, gustoća mreže upravo u tom području mora biti izrazito velika te što pravilnije raspoređena kako bi se dobili što točniji i pouzdaniji rezultati. Često se magnetska polja električnih strojeva mogu predstaviti kao dvodimenzionalni problem, no međutim valja imati na umu da su magnetska polja u stroju trodimenzionalni problem te da su rješenja dobivena analizom dvodimenzionalnog problema samo približno točna, jer primjerice ne uzimaju u obzir utjecaj skošenja utora ako ono postoji.

### **5.1. Izrada simulacijskog modela**

Danas se u projektiranju i modeliranju rotacijskih električnih strojeva koriste programski paketi koji korištenjem numeričke MKE metode, uz zadane početne i rubne uvjete, omogućuju točnije izračune elektromagnetskih prilika i odnosa u realnim konstrukcijama strojeva i napona induciranih u namotima [6, 8, 9, 10, 89, 90]. Jedan od njih je i komercijalni programski paket *Infolytica Magnet* koji je korišten za izradu 2D simulacijskog modela asinkronog motora. To je specijalizirani program za rješavanje elektromagnetskih problema kojim je moguće simulirati različita pogonska stanja (uključujući i ona kvarna) raznih vrsta električnih strojeva, aparata i uređaja. Na ovaj način moguće je izvršiti kontrolu provedenih

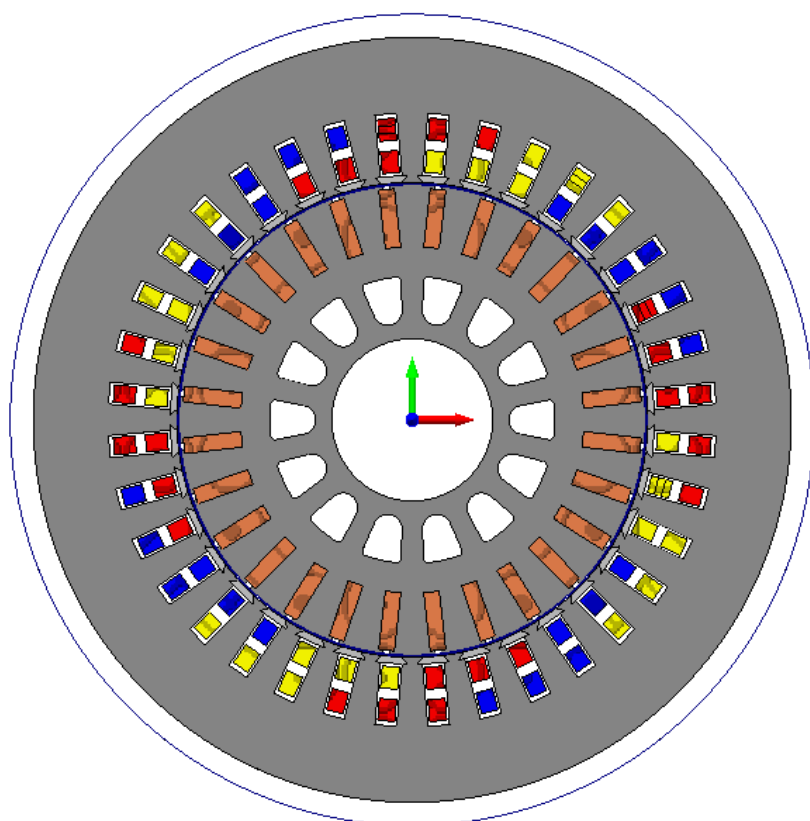
mjerenja ili pak proračuna te utvrditi područje odstupanja ulaznih podataka unutar kojih proračun ostaje dovoljno točan u usporedbi s mjerenjima.

Na osnovu tehničke dokumentacije (projektnih podataka) asinkronog motora (tablica 3.1) izrađen je 2D MKE model za izračun parametara motora u ispravnom i kvarnim stanjima. Utjecaj pojedinoga analiziranog kvara na inducirane napone u mjernim svicima izračunat je primjenom MKE metode. 2D MKE modelom u obzir su uzeti nelinearnost materijala (željezna jezgra izrađena od dinamolimova) i stvarna geometrija stroja. MKE izračuni na modelu koji odgovara stvarnom stroju nužni su kako bi se provjerila odabrana metoda i metodologija za otkrivanje kvarova motora te omogućilo da se na osnovu rezultata izračuna, definira algoritam za otkrivanje kvarova.

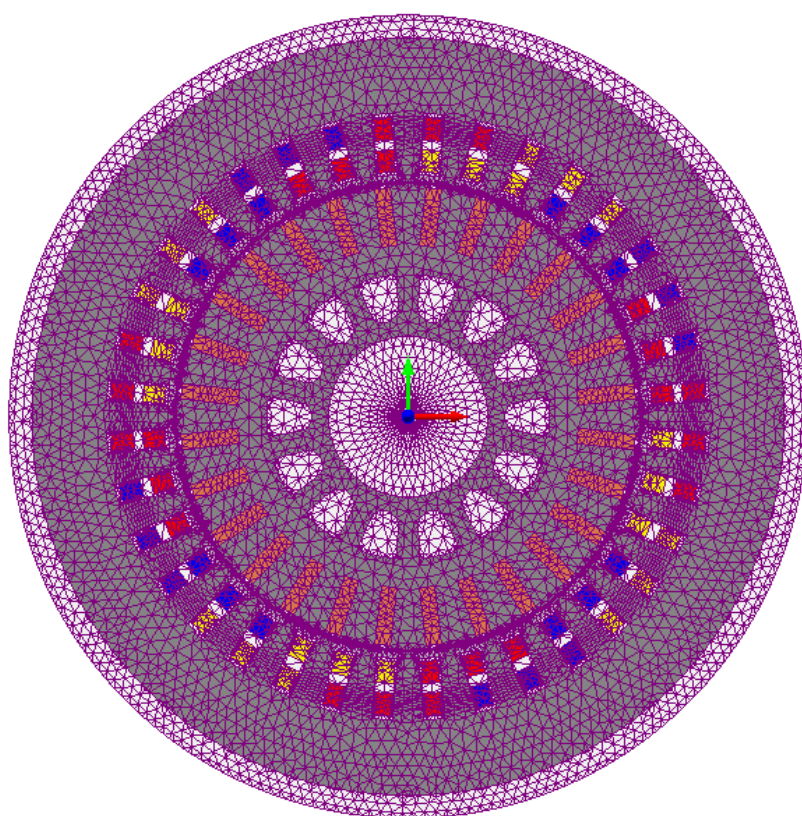
Na slici 5.1 prikazan je 2D model asinkronog motora na kojem su obavljeni izračuni magnetskih indukcija, magnetskih polja i induciranih napona. Za provedbu proračuna korišten je programski modul "*Transient 2D with motion*", tj. modul koji uključuje vrtnju rotora. Simulacijski proračun proveden je kod napona 276 V, 50 Hz (sinusno napajanje) kako bi bilo moguće kasnije, rezultate dobivene MKE proračunom usporediti s rezultatima mjerenja provedenih u laboratoriju. Prikaz mreže konačnih elemenata modela motora prikazan je na slici 5.2, dok je na slici 5.3 prikazan statorski i rotorski električni krug motora. Krug statora spojen je u zvijezdu, a krug rotorskog namota je kratkospojen. Otpori i induktiviteti u oba električna kruga predstavljaju otpor glava namota i otpor segmenta prstena (radni i induktivni) čije su vrijednosti dobivene iz analitičkog proračuna. Na ovaj način je otpor glava namota i otpor prstena uzet u obzir, budući da s 2D modelom nije moguće uzeti u obzir čeonu dio statorskoga i rotorskog namota. Za sve proračune, odabrana gustoća mreže u strukturnim dijelovima modela motora (željezni paket i bakreni vodiči) je 10 mm, a za zračni raspor iznosi 1 mm, kako bi se dobili što točniji rezultati. Odabrana je interpolacija po kvadratnom polinomu, dok je za rješavanje sustava jednadžbi u stroju primjenjena Newton – Raphson-ova metoda. U MKE proračunu odabrano je 800 točaka za jedan puni okret rotora. U tablici 5.1 navedeni su uvjeti simulacijskog proračuna gdje  $t_{sim}$  označava vrijeme trajanja simulacije, a  $t_{sim.kr.}$  vremenski korak simulacije.

Tablica 5.1 Uvjeti simulacijskog proračuna

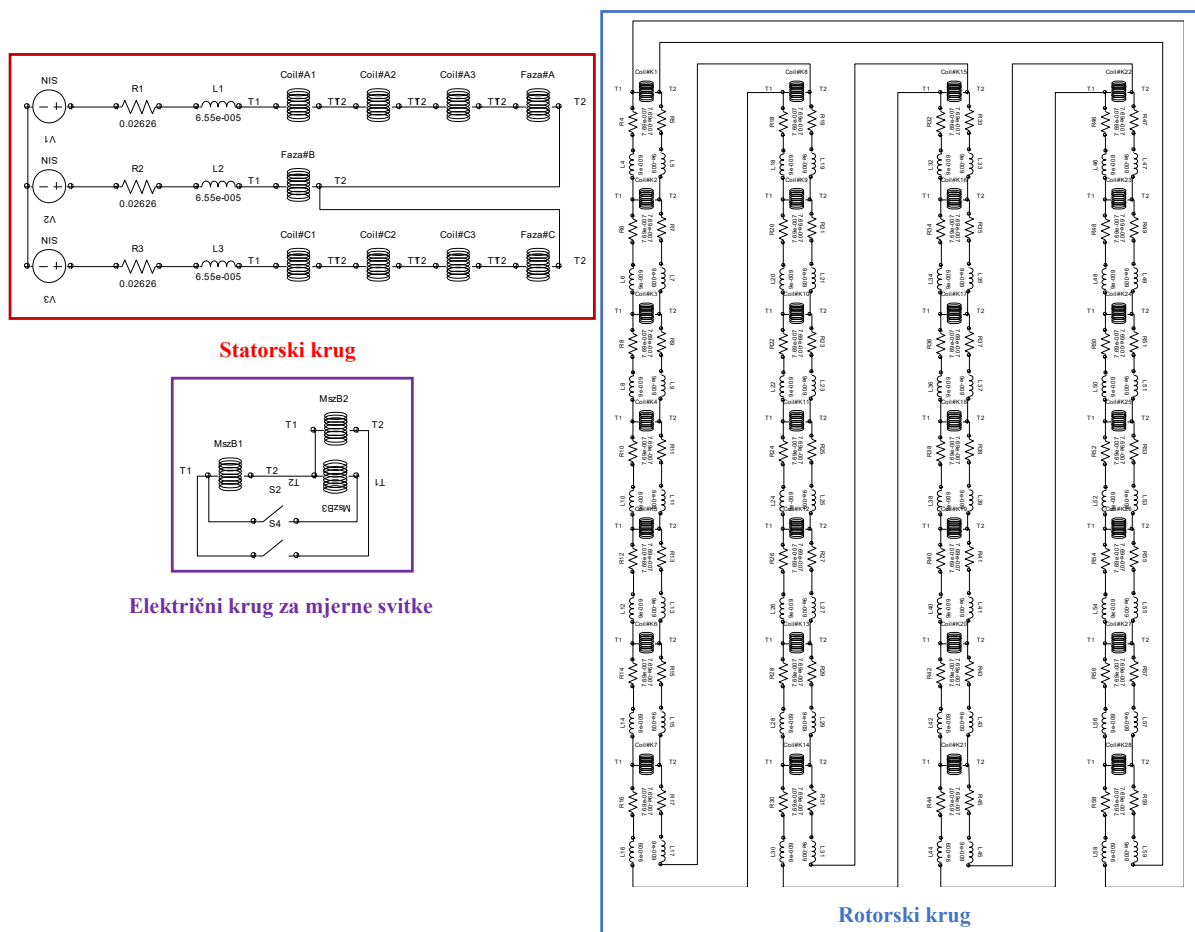
| U [V] | f [Hz] | $t_{sim}$ [ms] | $t_{sim.kr.}$ [ms] |
|-------|--------|----------------|--------------------|
| 276   | 50     | 1800           | 0,025              |



Slika 5.1 Dvodimenzionalni model motora u programskom okruženju *MagNet*



Slika 5.2 Mreža konačnih elemenata proračunskog modela



Slika 5.3 Spoj vanjskog kruga i modela motora

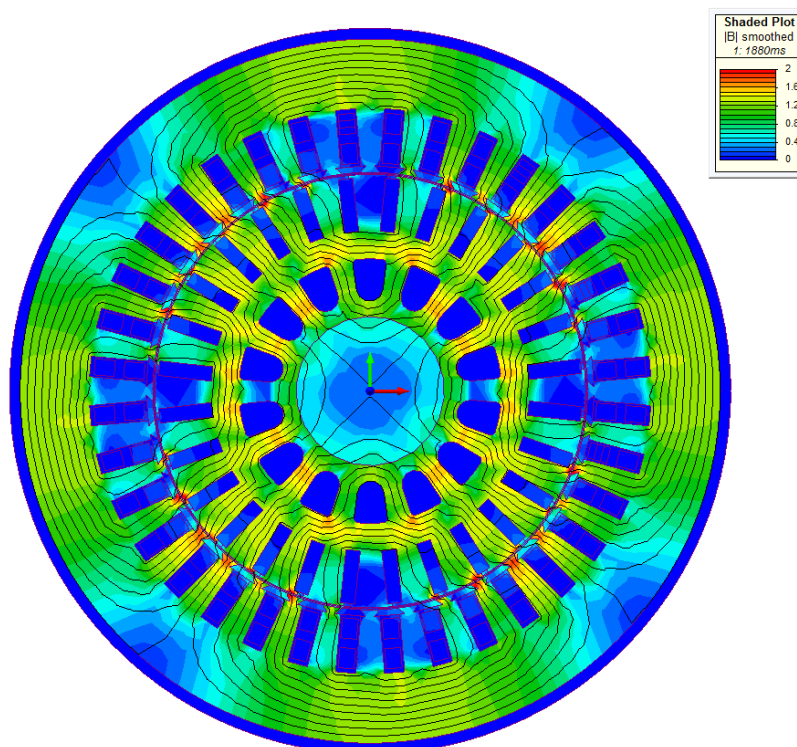
Valni oblici u mjernim svicima računati su za stanja motora navedena u tablici 5.2. Podaci su računati za sve varijante ispravnog i kvarnih stanja u kojima su provedena i mjerenja, radi kasnije usporedbe rezultata.

Tablica 5.2 Pregled računatih ispravnih i kvarnih pogonskih stanja asinkronog motora

| Radno stanje               | Ispravno stanje | Kvar – prekid štapa kaveza | Kvar – prekid prstena kaveza | Kvar – statički ekscentricitet | Kombinacija kvarova | Opis modela s izmjenama                              |
|----------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------|
| Nazivno opterećenje motora | •               |                            |                              |                                |                     |                                                      |
|                            |                 |                            |                              | •                              |                     | 15 % statičkog ekscentriciteta                       |
|                            |                 |                            |                              | •                              |                     | 20 % statičkog ekscentriciteta                       |
|                            |                 |                            |                              | •                              |                     | 25 % statičkog ekscentriciteta                       |
|                            |                 | •                          |                              |                                |                     | prekid jednog štapa                                  |
|                            |                 | •                          |                              |                                |                     | prekid dva štapa                                     |
|                            |                 | •                          |                              |                                |                     | prekid dva susjedna štapa                            |
|                            |                 |                            | •                            |                                |                     | prekid prstena                                       |
|                            |                 |                            |                              |                                | •                   | prekid jednog štapa uz 25% statičkog ekscentriciteta |

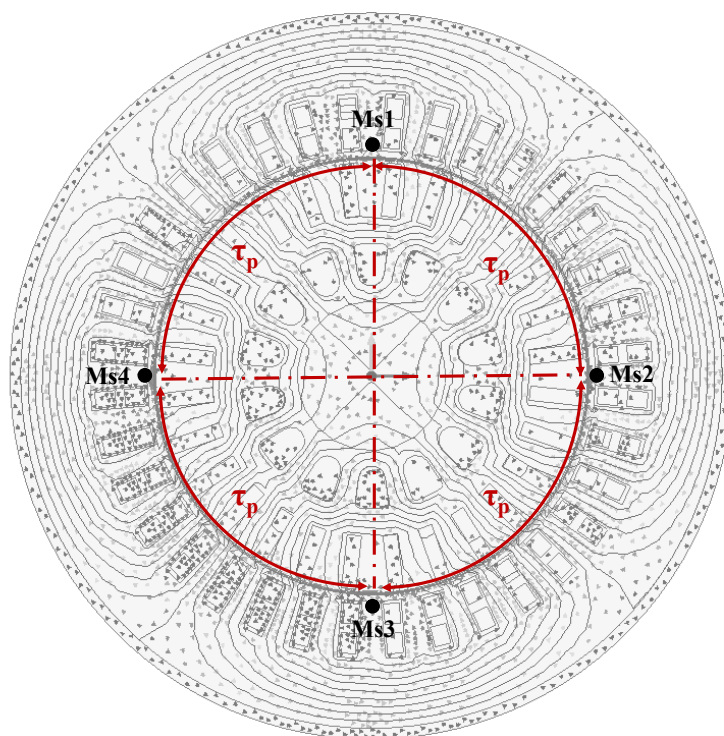
## 5.2. Rezultati proračuna za ispravno stanje

Osim numeričkih izlaznih rezultata, programski paket *Infolytica Magnet* omogućuje i grafički prikaz magnetskog polja u stroju za određeni trenutak. Slika 5.4 prikazuje raspodjelu gustoće toka magnetskog polja u 2D modelu motora u ispravnom stanju za nazivno opterećenje kod 276 V, 50 Hz u vremenskom trenutku  $t = 1880 \text{ ms}$  kada je završen simulacijski proračun odnosno postignuto stacionarno stanje motora.

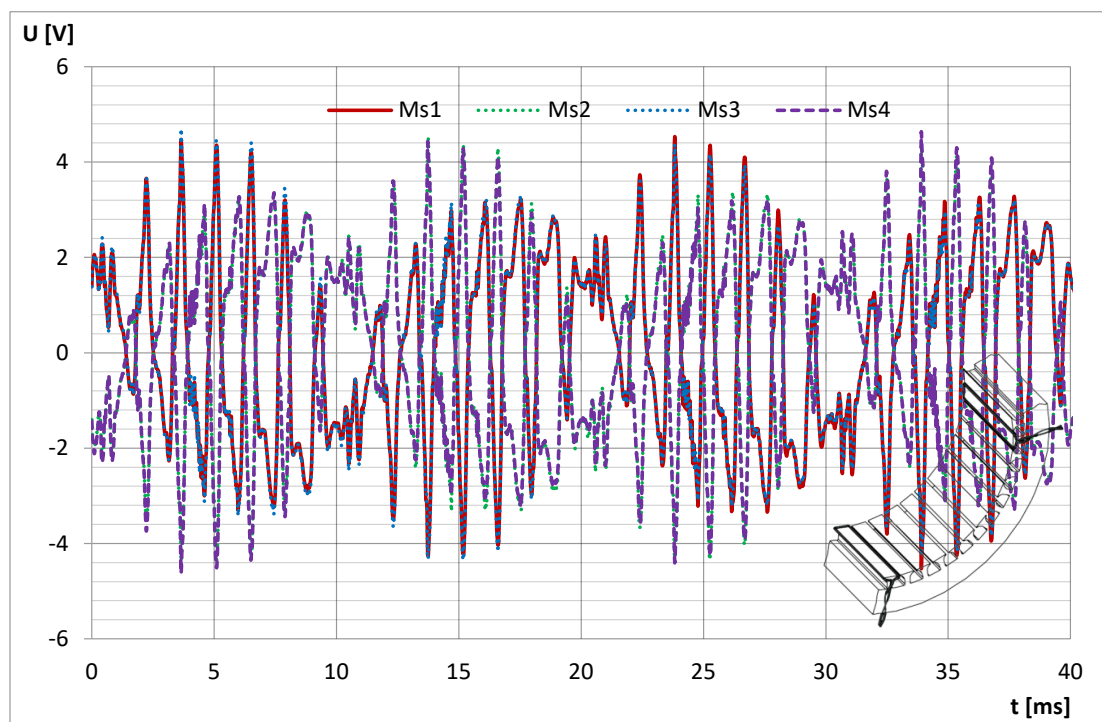


Slika 5.4 Raspodjela gustoće magnetskog toka asinkronog motora u ispravnom stanju

U 2D modelu motora na mjestima gdje su modelirani mjerni svici za otkrivanje kvarova rotora (pozicije mjernih svitaka u modelu motora prikazane su na slici 5.5), moguće je izračunati vremensku ovisnost induciranih napona kod vrtnje rotora. Slika 5.6. prikazuje valni oblik napona koji se inducira u mjernim svicima koji su međusobno razmaknuti za polni korak  $\tau_p$ . Slika 5.7 prikazuje valne oblike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su smješteni u zračni raspor stroja (na zub statora) te su prostorno razmaknuti za dvostruki polni korak  $2\tau_p$ , a slika 5.8 prikazuje valne oblike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms2 koji su prostorno razmaknuti za polni korak  $\tau_p$ . Izračunati valni oblici prikazani su za jedan puni okret stroja što odgovara vremenskom intervalu od 40 ms budući da je riječ o četveropolnom stroju ( $4\tau_p$ ).



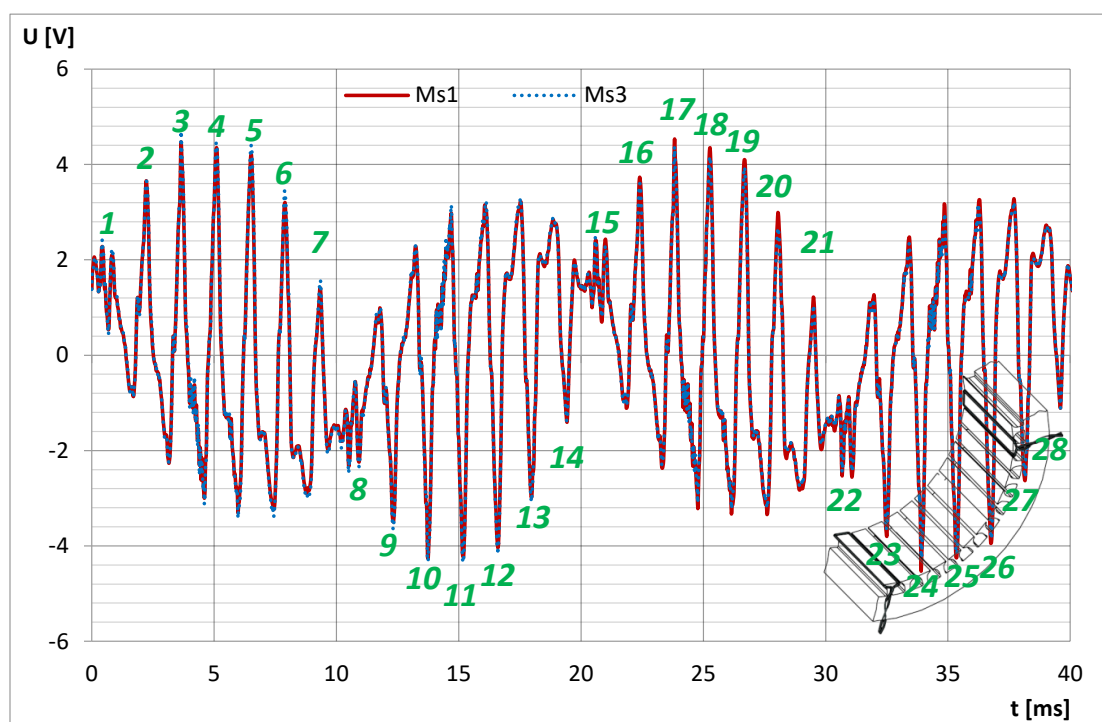
Slika 5.5 Pozicije mjernih svitaka Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 za otkrivanje kvarova u modelu motora



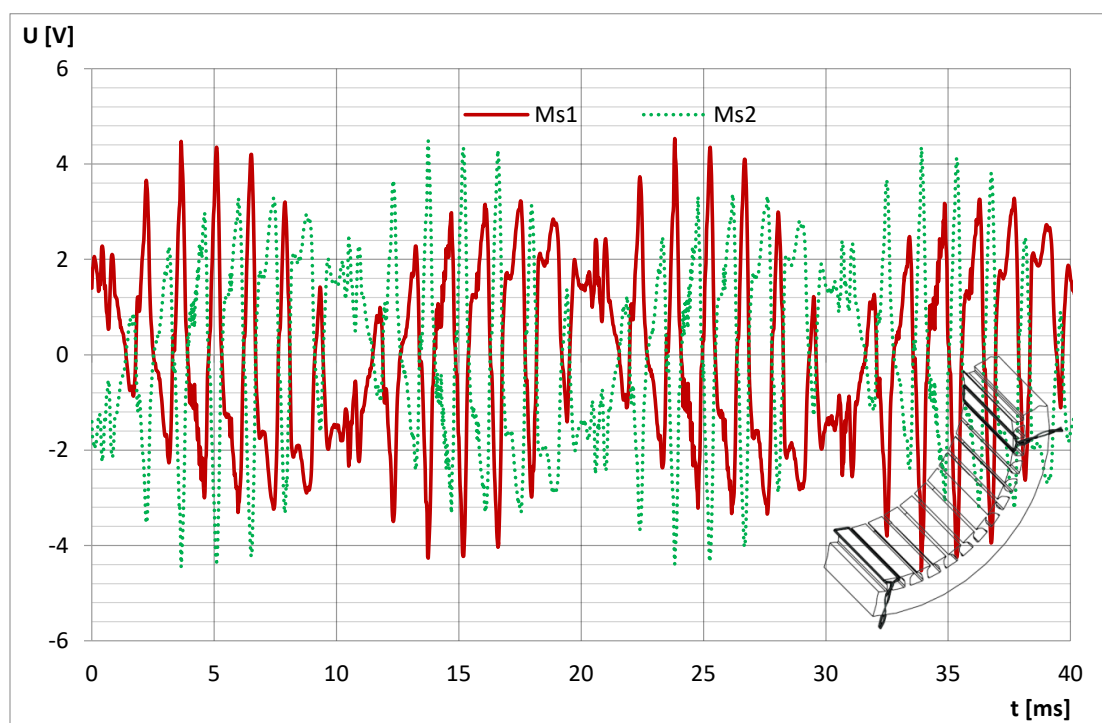
Slika 5.6 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 u ispravnom stanju

Kako bi se objasnili valni oblici induciranog napona u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 koji su ugrađeni u zračni raspored stroja potrebno je poznavati fizikalnu sliku stroja, ali i

utjecaj pojedinoga konstrukcijskog elementa na njihov oblik. Za razmatranje oblika induciranog napona u svicima dovoljno je razmotriti samo jedan mjerni svitak. Ukoliko se razmatra valni oblik svitka Ms1 (pozicija u modelu motora prema slici 5.5), tada se u njemu jasno vide nagli porasti i propadi napona. Ti porasti i propadi posljedica su naizmjeničnog prolaska zuba i utora rotora u odnosu na svitak smješten na statorski paket. U ovom konkretnom slučaju taj broj porasta i propada iznosi 28, što odgovara točno broju utora rotora odnosno broju štapova kaveznog namota (projektne podaci motora se nalaze u tablicama 3.1 i 3.2). Na slici 5.7 zelenim brojevima označeni su utjecaji štapova kaveza u valnom obliku induciranog napona. Ukoliko se analiziraju preostali svici Ms2, Ms3 i Ms4 (slika 5.7 i 5.8) jasno se vidi da je njihov valni oblik identičan, a jedino što se razlikuje je smjer induciranog napona. Napon induciran u Ms2 (udaljen od Ms1 za  $\tau_p$ ) je u protufazi u odnosu na napon induciran u svitku Ms1, a napon induciran u Ms3 (udaljen od Ms1 za  $2\tau_p$ ) je u fazi s naponom induciranim u Ms1. Razlog zašto je to tako je taj što mjerni svitak Ms2 ima po apsolutnom iznosu jednak ulančeni magnetski tok, ali je smjer vektora gustoće magnetskog toka različit. U slučaju mjernog svitka Ms3 osim što je jednak ulančeni magnetski tok, jednak je i smjer vektora gustoće magnetskog toka. Na slici 5.5 uz prikaz pozicija mjernih svitaka, dan je i prikaz raspodjele smjera magnetskih linija koji jasno objašnjava smjer induciranog napona u mjernim svicima.

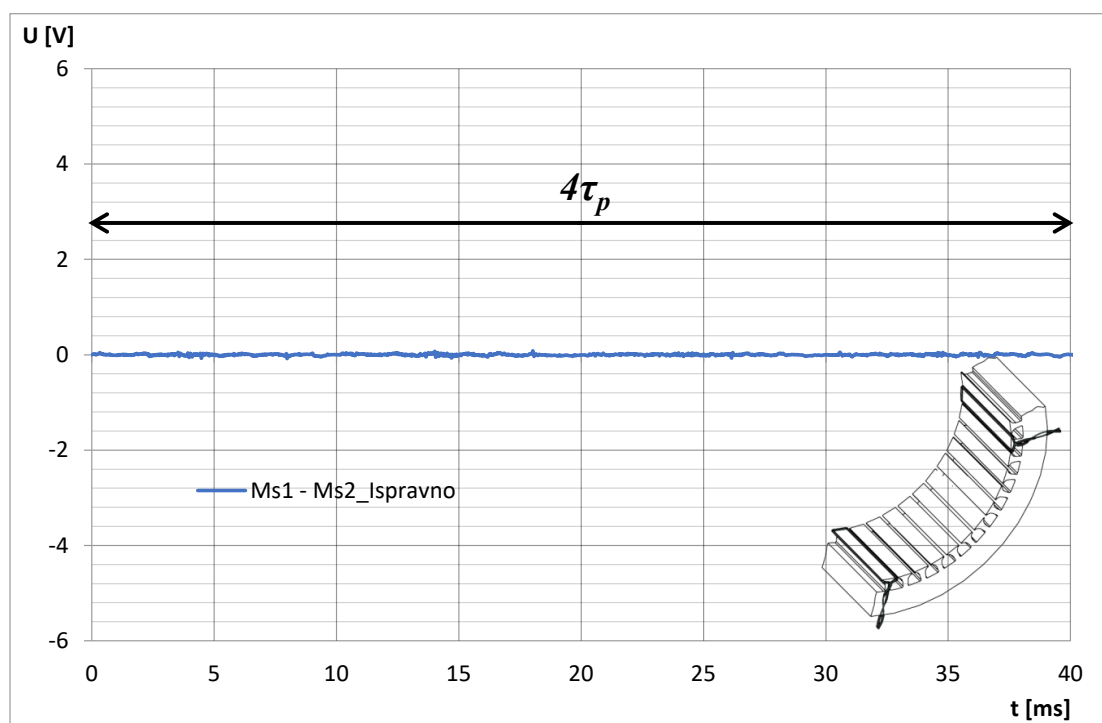


Slika 5.7 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  u ispravnom stanju

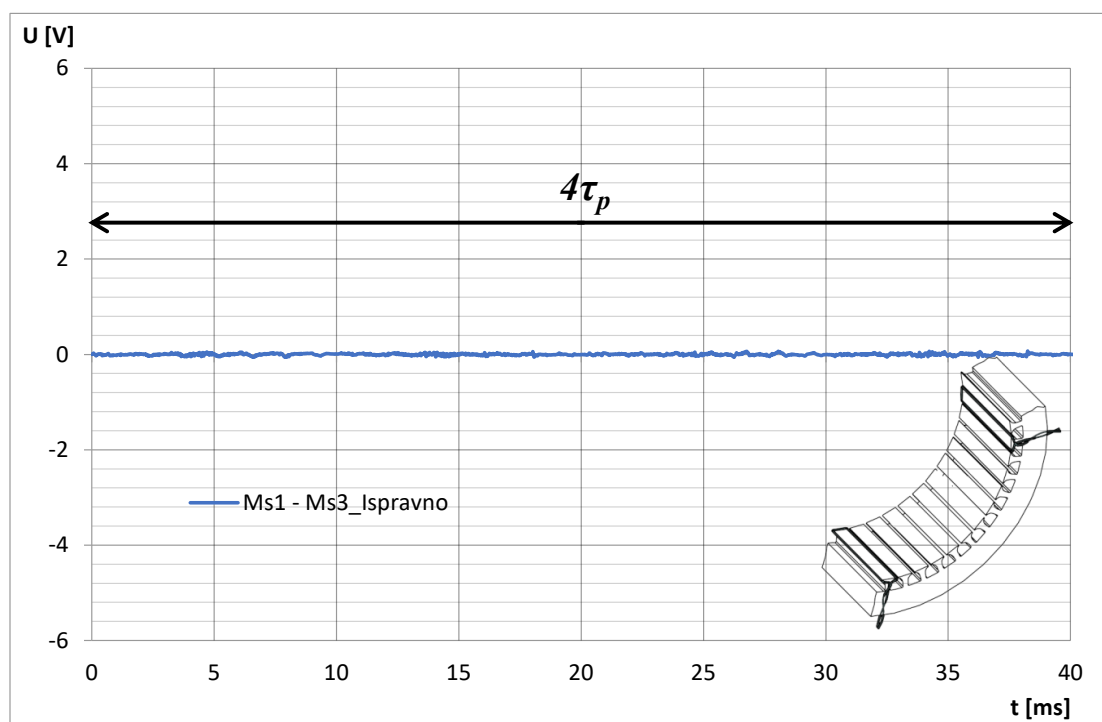


Slika 5.8 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms2 prostorno razmaknutih za  $\tau_p$  u ispravnom stanju

Primjenom metode oduzimanja induciranih napona u mjernim svicima prema principu koji je detaljno opisan u poglavlju 4, dobiveni su valni oblici prikazani na slikama 5.9 i 5.10. Analizom i pregledom valnih oblika na navedenim slikama, jasno se vidi da u ispravnom stanju razlika napona dobivena oduzimanjem induciranih napona svitaka Ms1 i Ms2 na polnom koraku te Ms1 i Ms3 na dvostrukom polnom koraku je jednaka ničici.



Slika 5.9 Razlika napona dobivena serijskim spajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms2 (prostorno razmaknutih za  $\tau_p$ ) u ispravnom stanju



Slika 5.10 Razlika napona dobivena serijskim spajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$ ) u ispravnom stanju

### ***5.3. Analiza utjecaja statičkog ekscentriciteta i oštećenja kaveza asinkronog motora na inducirane napone u mjernim svicima dobivena numeričkim proračunima***

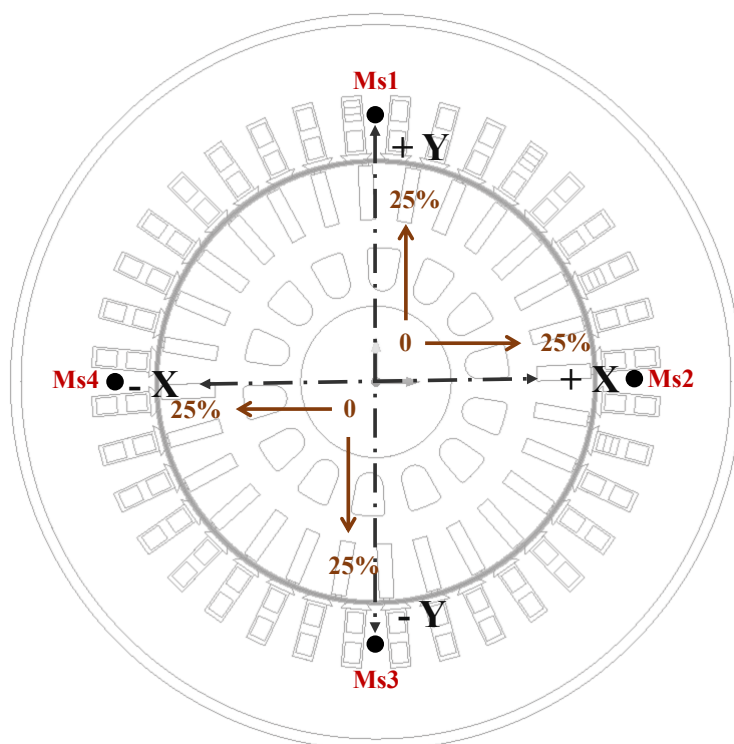
U ovom dijelu prikazani su rezultati niza simulacijskih proračuna dobivenih za različite varijante kvarnih stanja rotora kaveznog motora. Analiziran je utjecaj svakoga pojedinog kvara kaveznog rotora na inducirane napone u mjernim svicima koji su smješteni u zračni raspor motora i međusobno razmaknuti za polni korak. Kao što je prethodno navedeno u tablici 5.2 na MKE modelu motora provedena je analiza sljedećih vrsta kvarova:

- pojava statičkog ekscentriciteta različitih iznosa (15 %, 20 % i 25 %),
- prekid jednog štapa kaveza,
- prekid dva štapa kaveza,
- prekid dva susjedna štapa kaveza,
- prekid prstena,
- kombinacija kvarova.

U nastavku je dan pregled proračunatih kvarnih stanja s pripadajućim rezultatima.

#### ***5.3.1. Utjecaj statičkog ekscentriciteta rotora na inducirane napone u mjernim svicima***

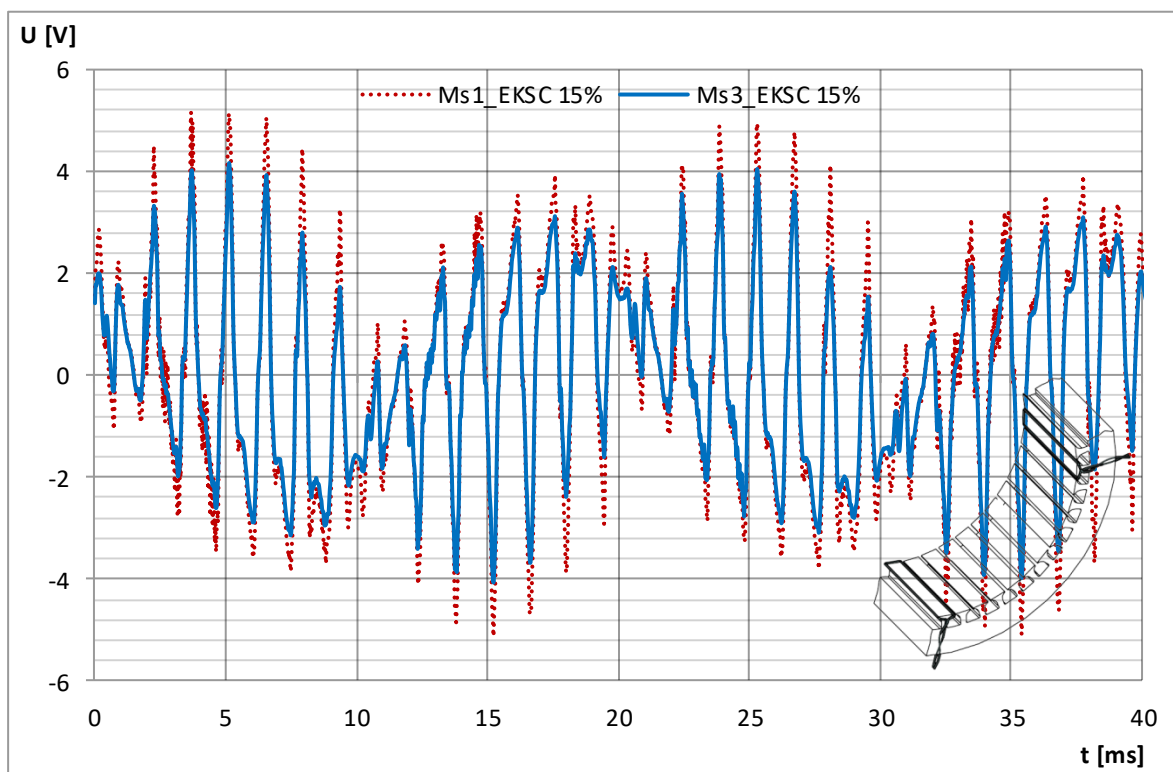
Prva vrsta kvara rotora koja je analizirana MKE modelom motora je statički ekscentricitet rotora. To je pojava kada su osi rotora i statora paralelne, ali se ne poklapaju. U MKE modelu ostvareno je statičko pomicanje rotora u četiri smjera odnosno pomicanje u pozitivnom i negativnom smjeru u  $x$  i  $y$  osi i to za iznose 15 %, 20 % i 25 % zračnog raspora motora. Smjerovi pomicanja rotora u  $x$  i  $y$  osi grafički su prikazani na slici 5.11. Analiza pomicanja rotora u  $x$  i  $y$  osi bila je potrebna kako bi se utvrdili trendovi ponašanja induciranih napona u mjernim svicima u ovisnosti o pomaku rotora odnosno izradile odgovarajuće krivulje ovisnosti. Također, i zbog same validacije rezultata mjerenja (modelom motora u laboratoriju moguće je simulirati pomake prema slici 5.11) i utvrđivanja odstupanja mjerenja u odnosu na proračun, provedeni su MKE proračuni utjecaja statičkog ekscentriciteta na inducirane napone u svicima kod pomaka rotora u  $x$  i  $y$  osi.



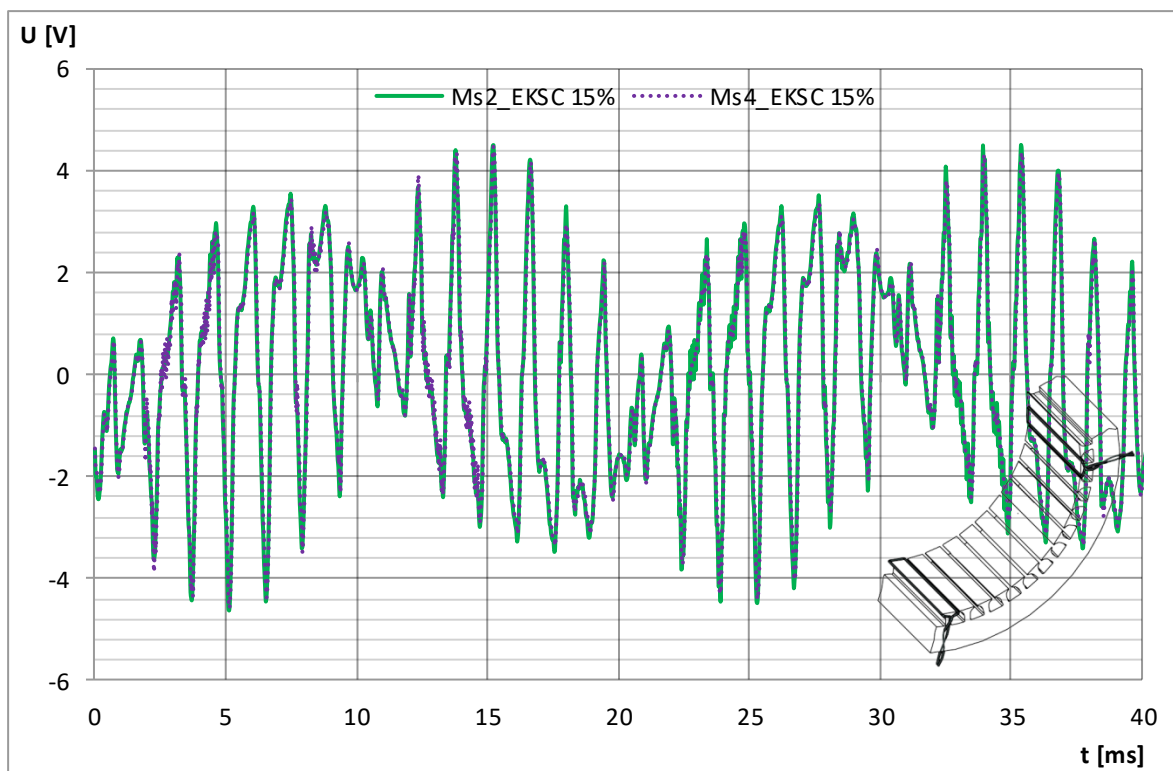
Slika 5.11 Raspored mjernih svitaka zajedno sa smjerovima i iznosima pomicanja rotora kod simulacije statičkog ekscentriciteta

Na slici 5.12 prikazana je usporedba induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,15 mm) i pomicanja rotora u smjeru + y osi. Analizom induciranog napona mjernih svitaka sa slike 5.12 jasno se može vidjeti da je za ovaj iznos statičkog ekscentriciteta, napon induciran u svitku Ms1 po apsolutnom iznosu veći od napona induciranog u Ms3. To je i očekivano budući da je rotor, a time i okretno magnetsko polje rotora bliže svitku Ms1 pa je stoga i za očekivati da je i inducirani napon veći nego što je u svitku Ms3. Na slici 5.13 prikazana je usporedba induciranog napona u Ms2 i Ms4. Usporedbom induciranog napona u ova dva svitka može se vidjeti da nema značajnije promjene u valnom obliku i amplitudi induciranih napona te su naponi gotovo identični po iznosu i obliku. Također to je i očekivani rezultat budući da je zračni raspor u odnosu na poziciju ova dva svitka jednak za oba svitka. Na slici 5.14 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3. Ukoliko se taj valni oblik usporedi s valnim oblikom dobivenim u ispravnom stanju za svitke Ms1 i Ms3 jasno je uočljivo da je on različit od nule i samim time upućuje na prisutnost kvara, što je u ovom konkretnom analiziranom slučaju pojava statičkog ekscentriciteta. Maksimalni porast napona u valnom obliku napona koji je dobiven oduzimanjem iznosi 1,65 V, a efektivna vrijednost tog napona iznosi 0,61 V. U odnosu na ispravno stanje kada je vrijednost naponskog signala jednaka ničici, napon dobiven oduzimanjem jasno signalizira

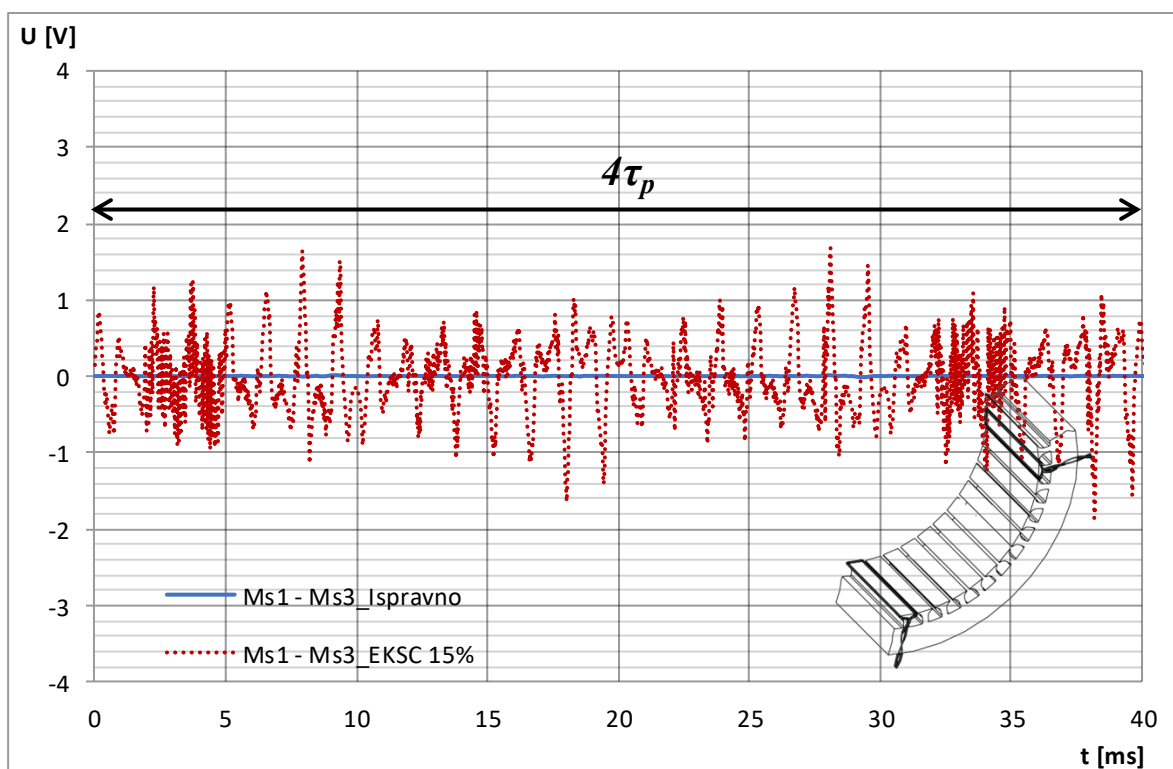
pojavu kvara i može se upotrijebiti kao signalizirajući parametar za otkrivanje kvara rotora. Valni oblici na navedenim slikama prikazani su za jedan puni okret rotora motora odnosno  $4\tau_p$  što odgovara vremenskom intervalu od 40 ms.



Slika 5.12 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru +  $y$  osi)

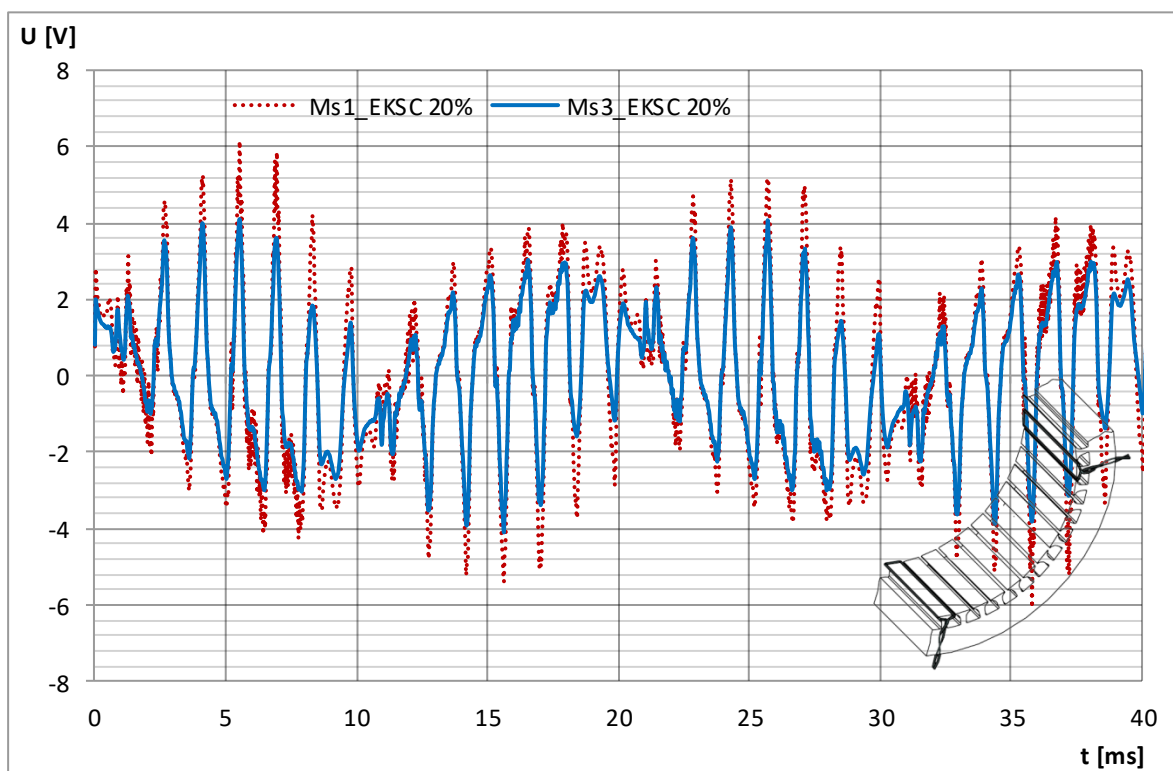


Slika 5.13 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)

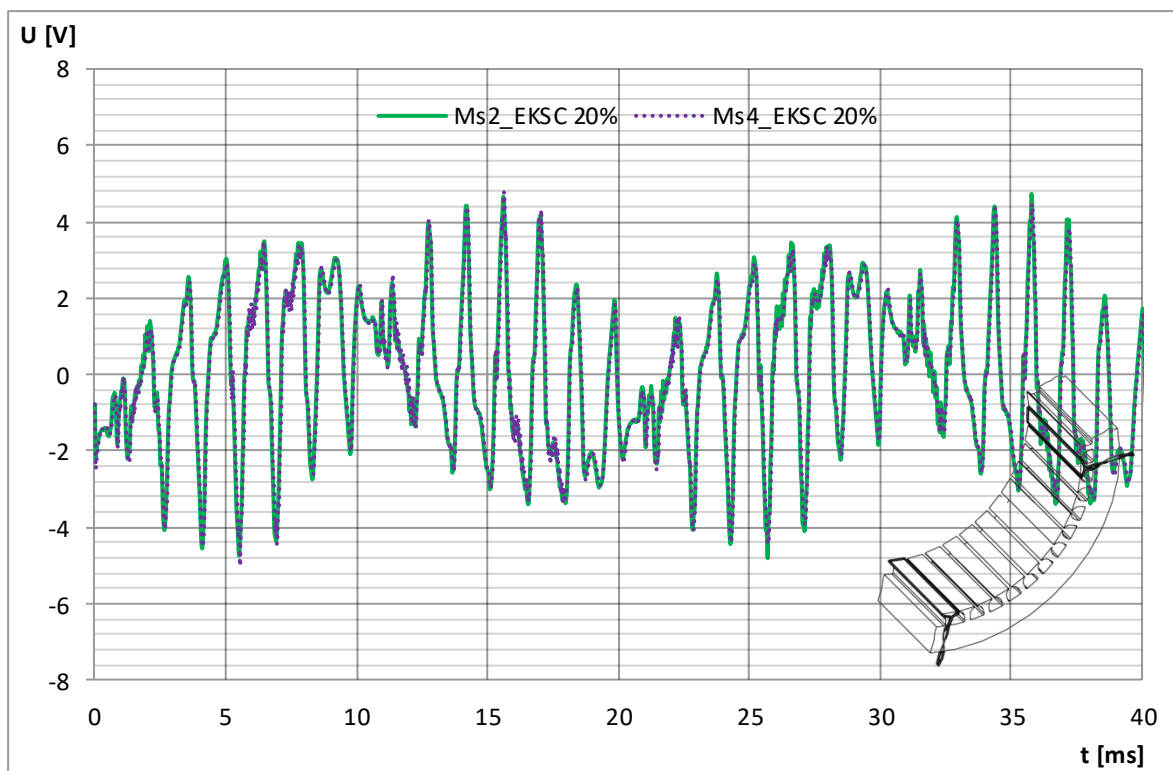


Slika 5.14 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %)

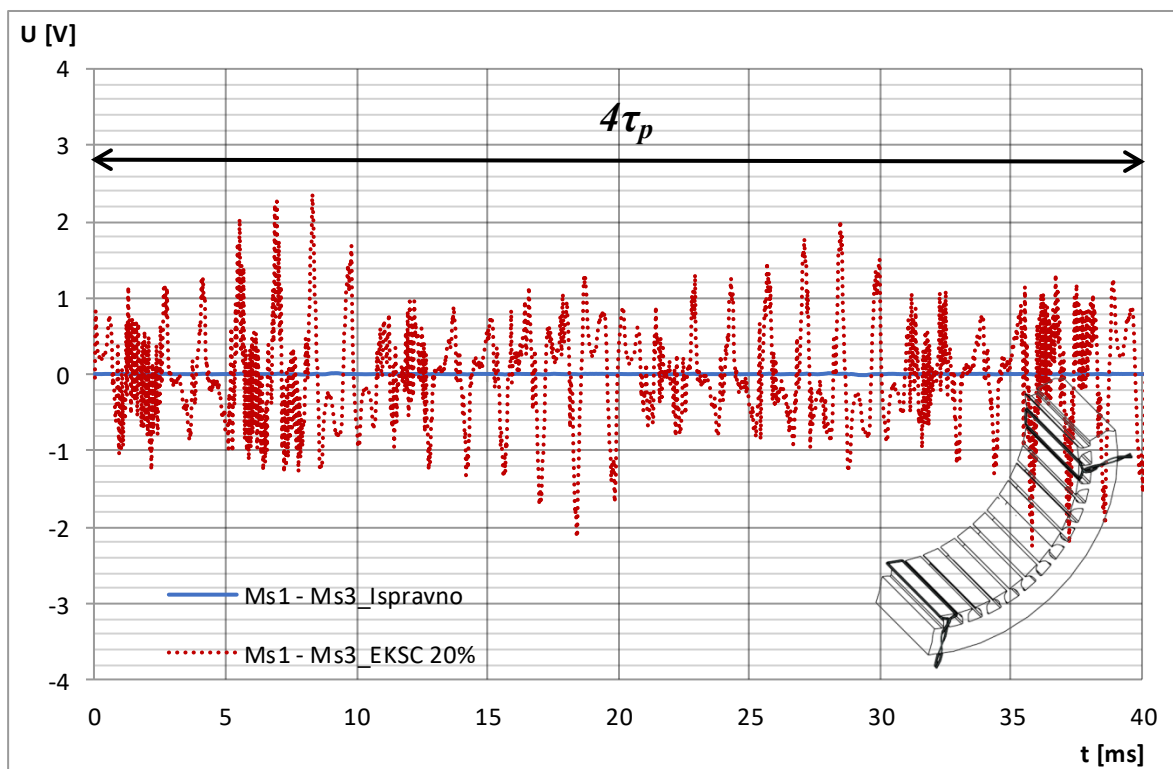
Na slici 5.15 prikazana je usporedba induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,20 mm) i pomicanja rotora u smjeru + y osi. Na slici 5.16 prikazana je usporedba induciranog napona u Ms2 i Ms4, a na slici 5.17 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3.



Slika 5.15 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)

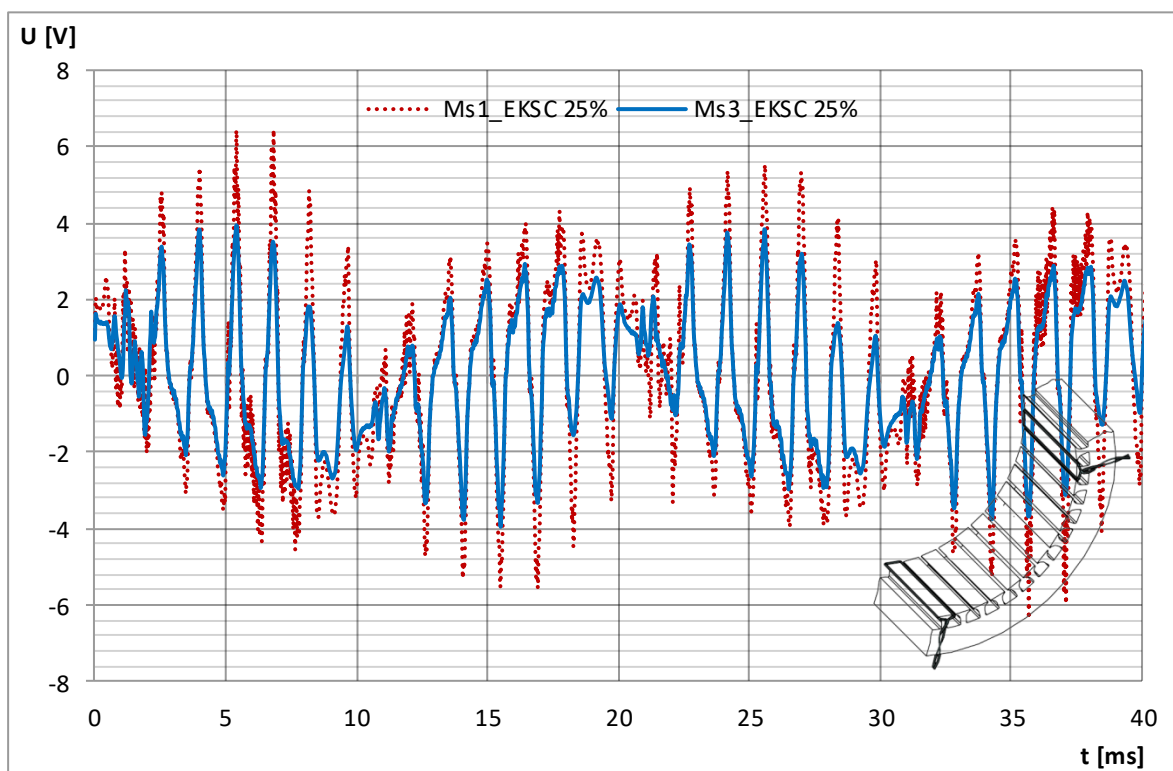


Slika 5.16 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)

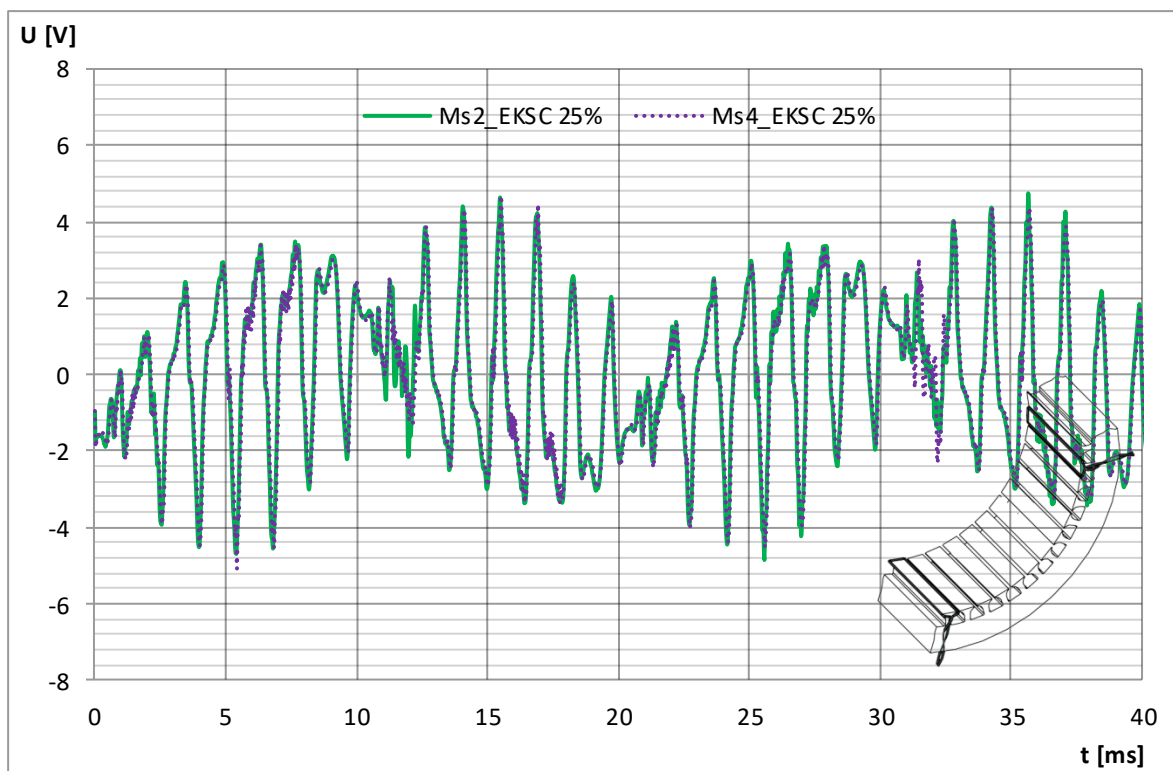


Slika 5.17 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %)

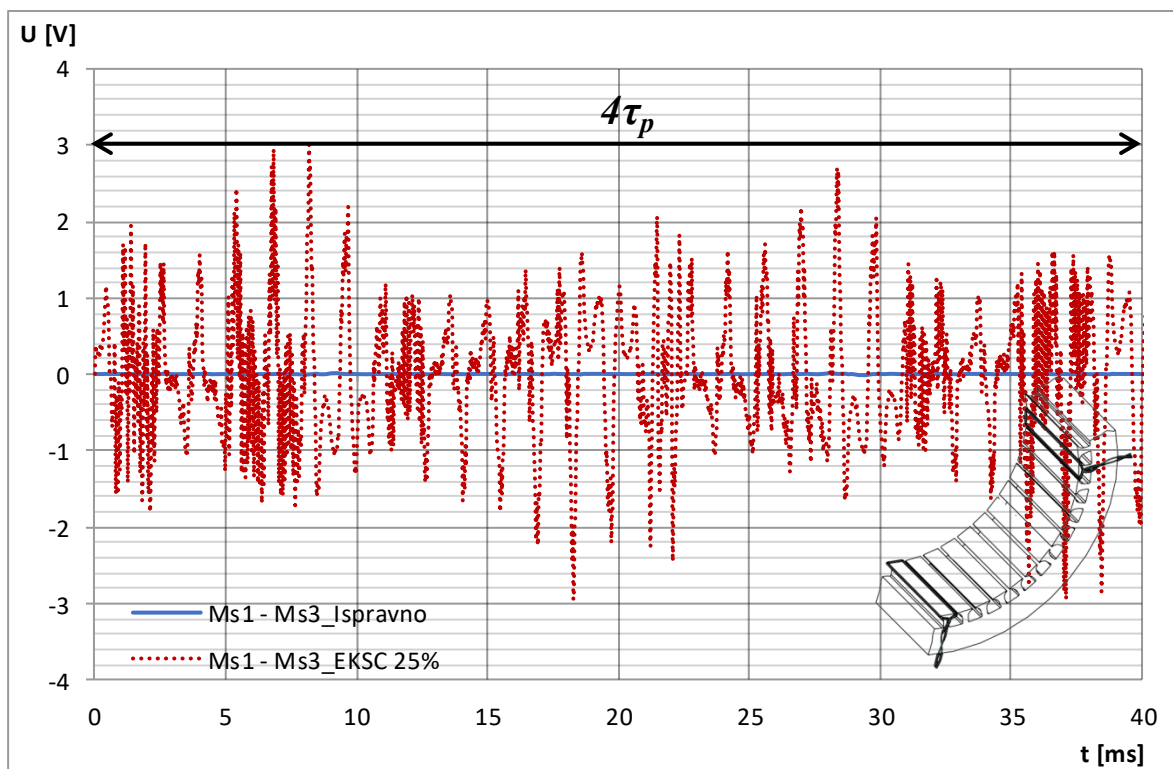
Na slici 5.18 prikazana je usporedba induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,25 mm) i pomicanja rotora u smjeru + y osi. Na slici 5.19 prikazana je usporedba induciranog napona u Ms2 i Ms4, a na slici 5.20 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3.



Slika 5.18 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)

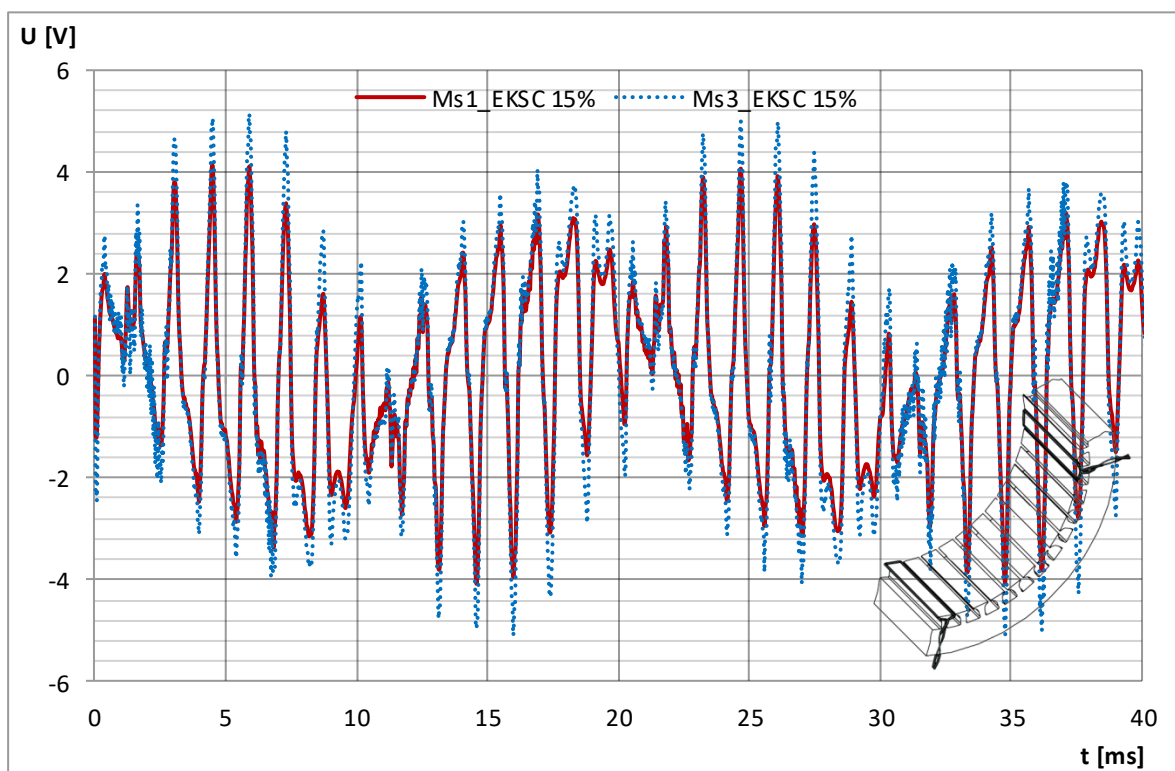


Slika 5.19 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)

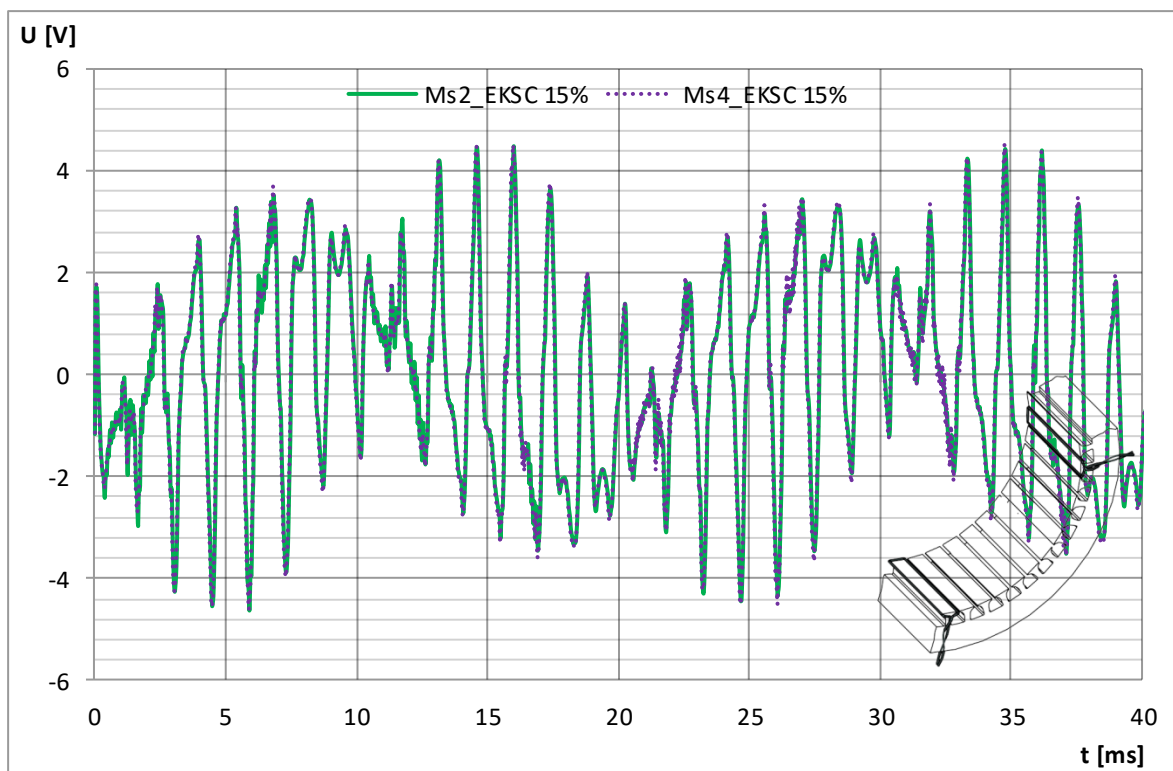


Slika 5.20 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %)

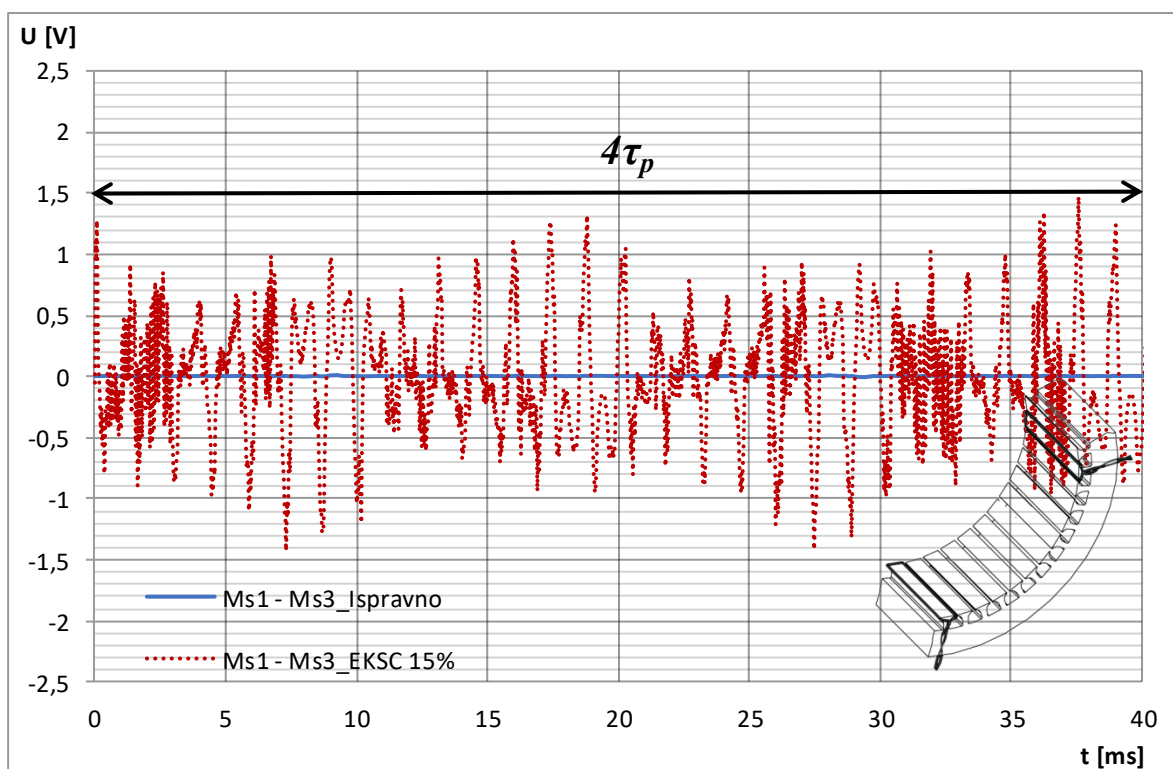
Na slici 5.21 prikazana je usporedba induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,15 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $-y$  osi. Na slici 5.22 prikazana je usporedba induciranog napona u Ms2 i Ms4, a na slici 5.23 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3.



Slika 5.21 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-y$  osi)

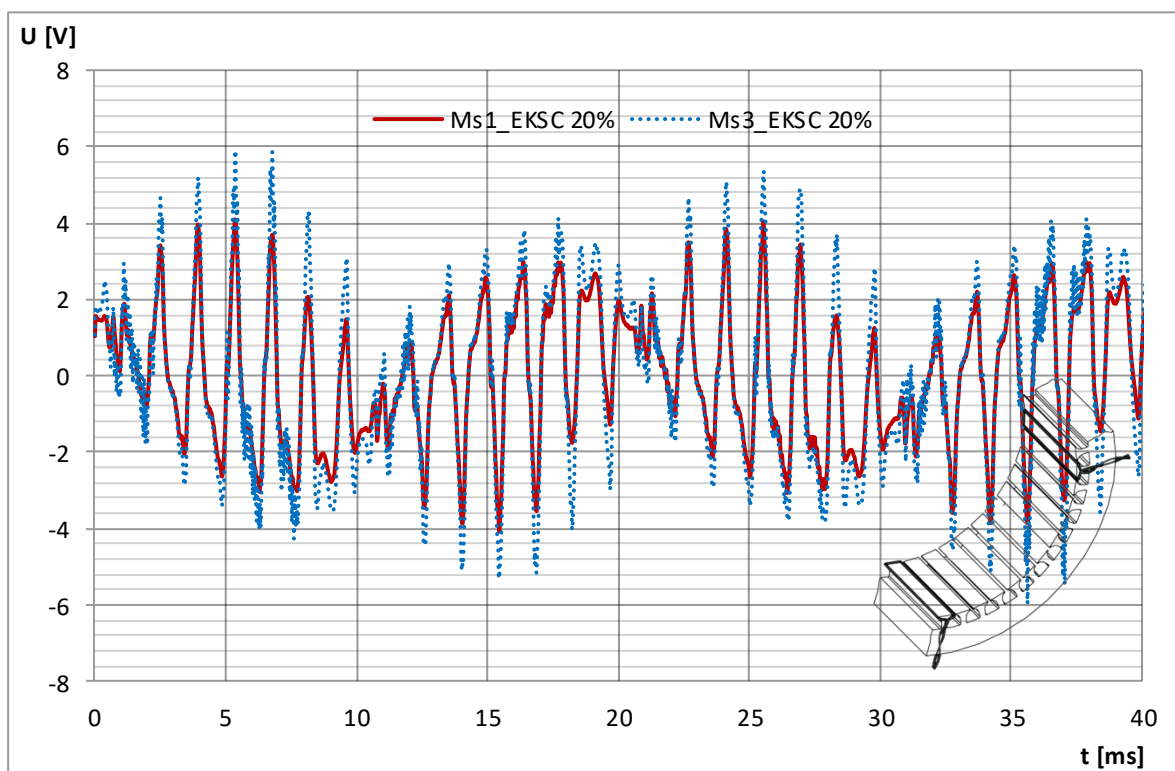


Slika 5.22 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru – y osi)

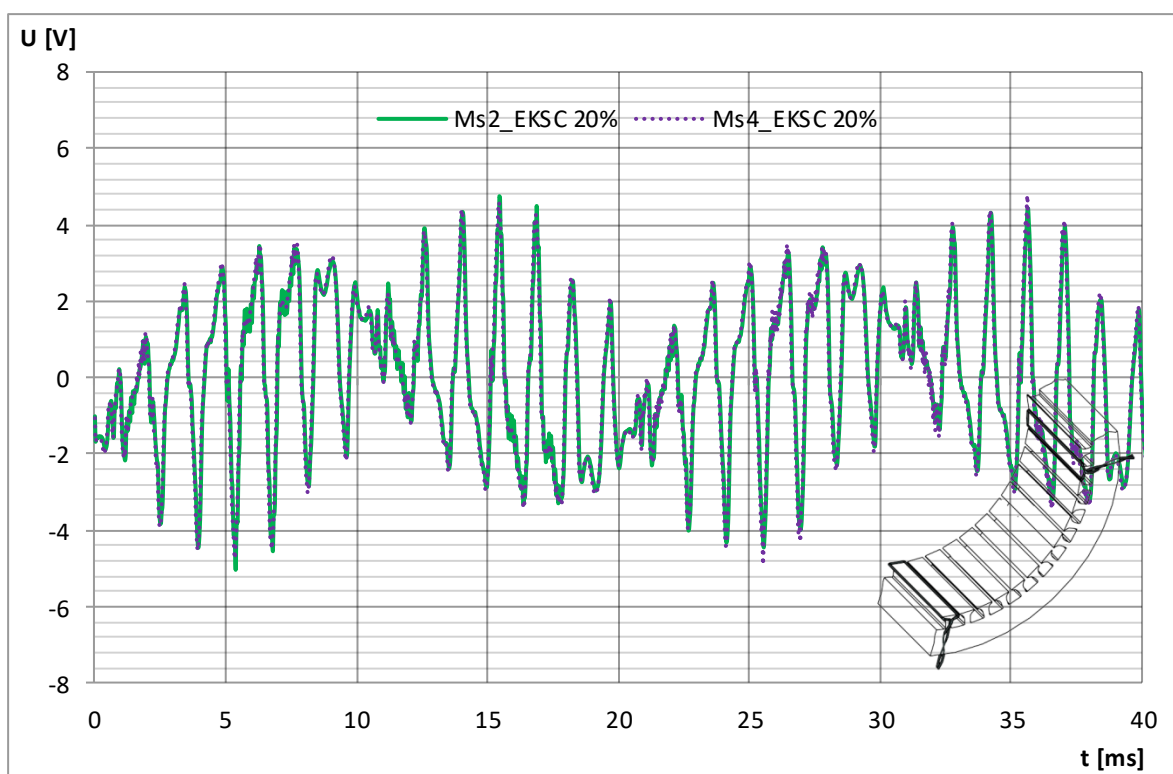


Slika 5.23 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %)

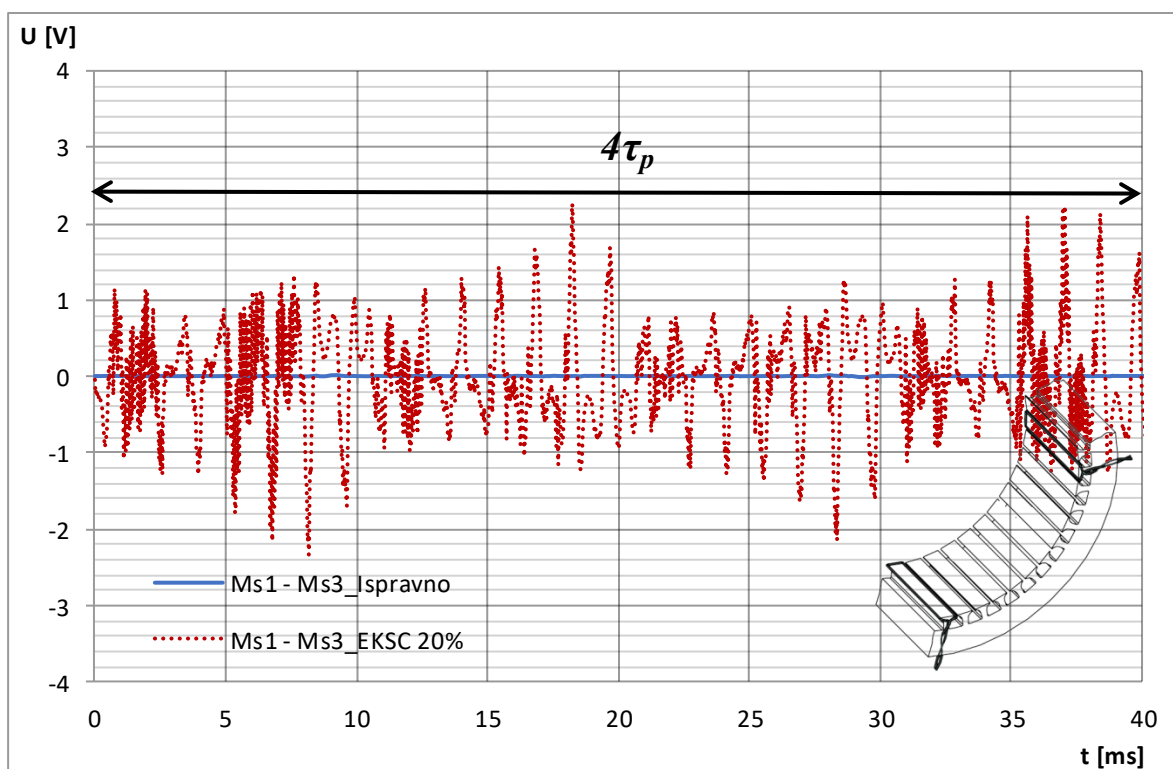
Na slici 5.24 prikazana je usporedba inducirano napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,20 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $-y$  osi. Na slici 5.25 prikazana je usporedba inducirano napona u Ms2 i Ms4, a na slici 5.26 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem inducirano napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3.



Slika 5.24 Usporedba valnih oblika inducirano napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-y$  osi)

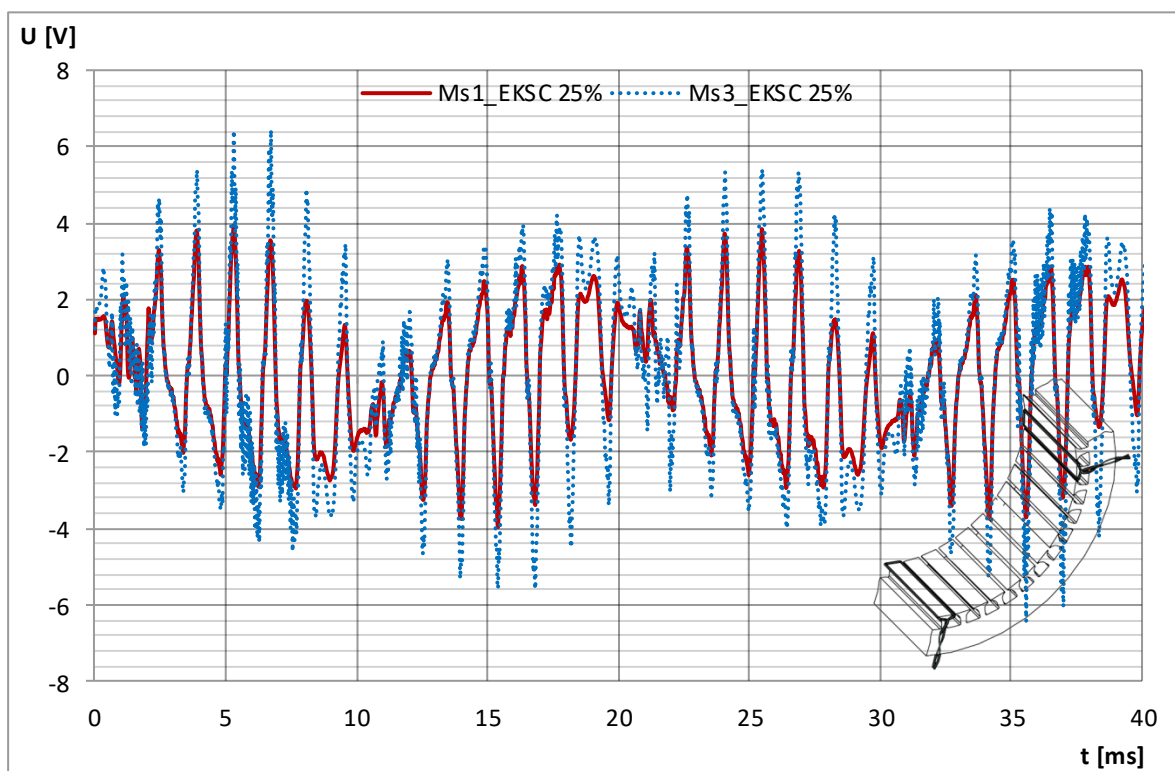


Slika 5.25 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-y$  osi)

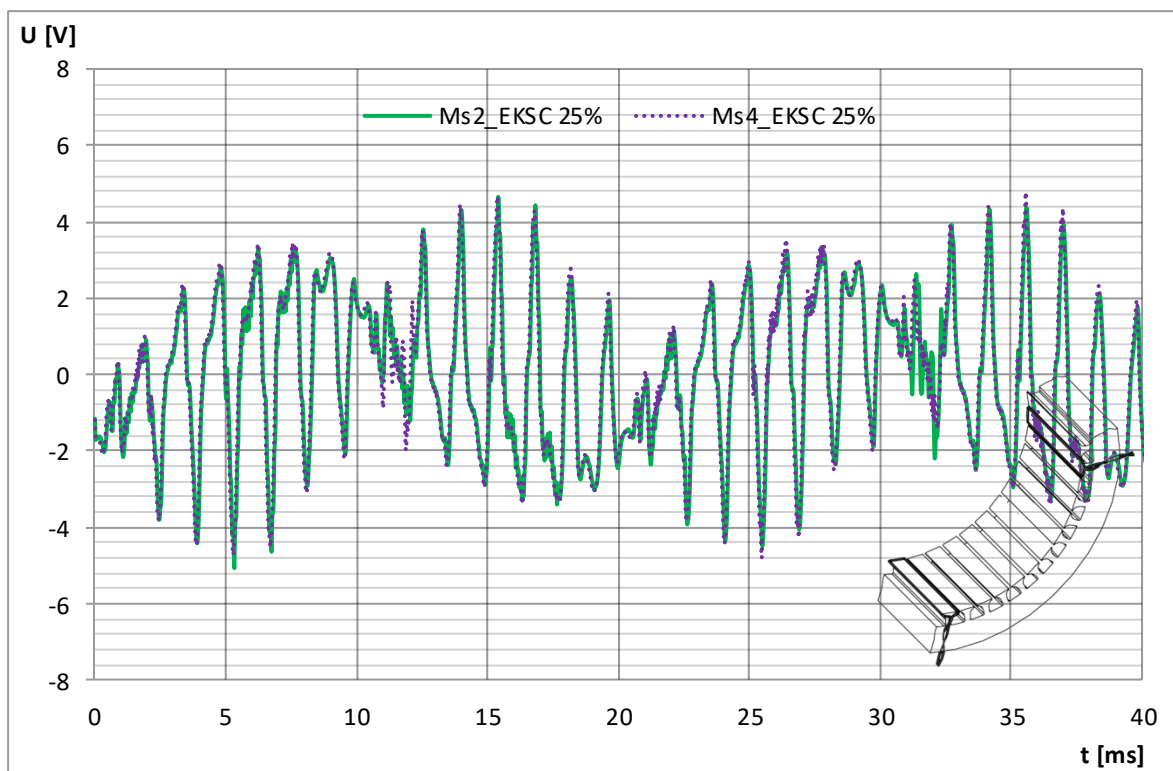


Slika 5.26 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %)

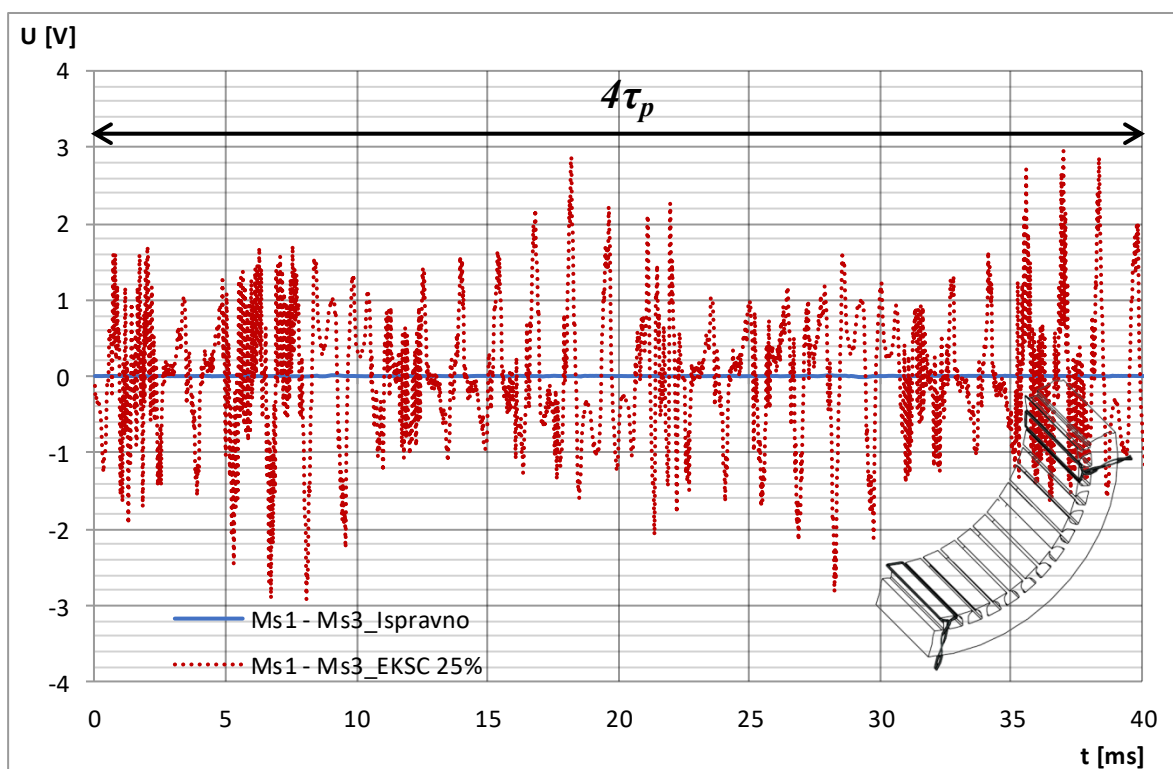
Na slici 5.27 prikazana je usporedba induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,25 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $-y$  osi. Na slici 5.28 prikazana je usporedba induciranog napona u Ms2 i Ms4, a na slici 5.29 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3.



Slika 5.27 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-y$  osi)



Slika 5.28 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-y$  osi)



Slika 5.29 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %)

U tablici 5.3 navedene su efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 dobivene proračunom uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru. Vrijednosti su dobivene za pomicanje rotora za iznos 15 %, 20 % i 25 % zračnog raspora u pozitivnom i negativnom smjeru  $y$  osi. Analizom podataka iz tablice može se zaključiti sljedeće:

- prilikom pojave statičkog ekscentriciteta neovisno o smjeru pomicanja iz tablice 5.3 vidljivo je da je inducirani napon veći u odnosu na ostale upravo u onom mjernom svitku kojemu je rotor najbliži, a najmanji u svitku koji je najudaljeniji,
- prilikom pomicanja rotora u  $+y$  smjeru najveći napon se inducira u mjernom svitku Ms1, a najmanji u Ms3,
- prilikom pomicanja rotora u  $-y$  smjeru najveći napon se inducira u mjernom svitku Ms3, a najmanji u Ms1,
- vrijednost induciranih napona mijenja se u ovisnosti o veličini iznosa statičkog ekscentriciteta,
- vrijednost induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 praktički se nije promijenila.

U slučaju ispravnog stanja, tj. kada nema statičkog ekscentriciteta vrijednost induciranih napona u sva četiri svitka je identična, tj. naponi su simetrični. Pomicanje rotora uzrokuje gubitak simetričnosti induciranih napona te dolazi do povećanja, odnosno smanjenja napona u pojedinom mjernom svitku. Kod pomicanja rotora po  $y$  osi, promjene induciranih napona se najviše očituju u mjernim svicima Ms1 i Ms3. Pošto su naponi u ta dva svitka najpodložniji promjeni, u tablici 5.3 (posljednji stupac) prikazano je postotno odstupanje između napona ta dva svitka. Primjerice, za analizirani slučaj statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka u smjeru  $+y$ , napon koji se inducira u Ms1 je za 39 % veći u odnosu na inducirani napon u Ms3, što u odnosu na ispravno stanje (naponi simetrični i identični) predstavlja značajno odstupanje. Takva promjena induciranih napona između analiziranih dva svitka jasan je pokazatelj prisutnosti nesimetrije u zračnom rasporu, odnosno statičkog ekscentriciteta rotora. Takav se indikator, stoga, može koristiti kao ključni parametar za utvrđivanje statičkog ekscentriciteta motora u sklopu određenog sustava za nadzor i praćenje stanja motora.

Na osnovu podataka iz tablice 5.3 izrađene su krivulje ovisnosti induciranih napona u mjernim svicima o pomaku rotora u vertikalnom smjeru. Slika 5.30 prikazuje promjenu induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ovisnosti o promjeni položaja rotora u

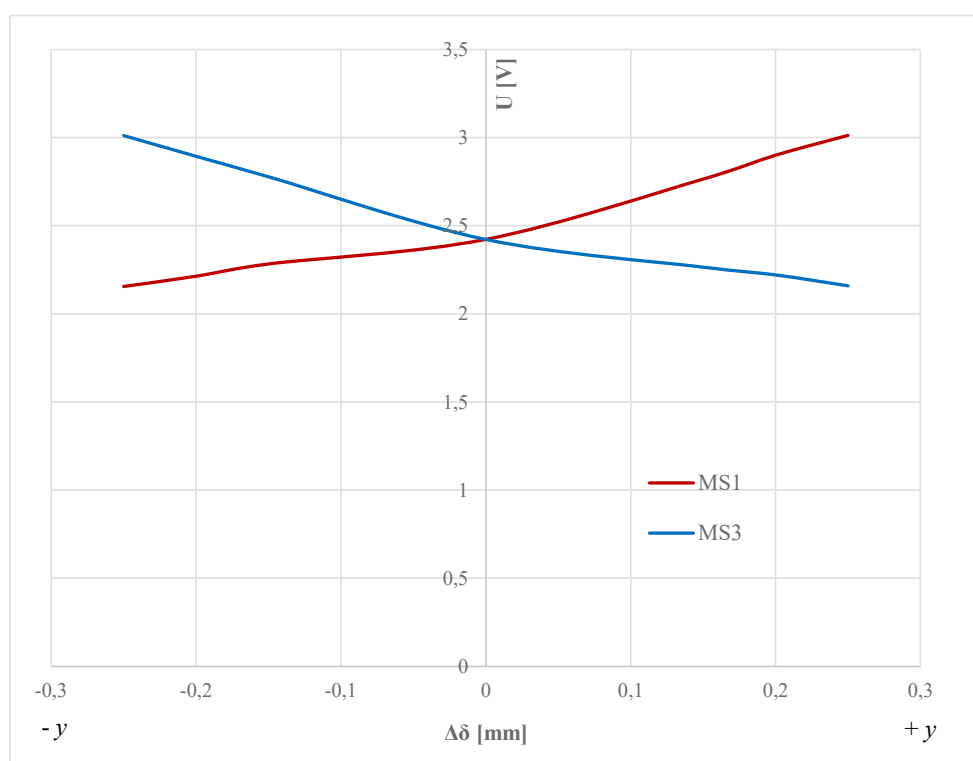
vertikalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta. Na slici 5.30 jasno se može vidjeti promjena induciranog napona u svitku Ms1, od njegove maksimalne vrijednosti (rotor najbliži) do njegove minimalne vrijednosti (rotor najudaljeniji). Analogno, situacija vrijedi i za mjerni svitak Ms3 u kojem se događa ista promjena induciranog napona kako se rotor približava ili udaljava od tog svitka. Slika 5.31 prikazuje promjenu induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 u ovisnosti o promjeni položaja rotora u vertikalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta. Iz slike 5.31 jasno se vidi da inducirani napon u svicima Ms2 i Ms4 je praktički konstantan i identičan po iznosu, što je i očekivano budući da su ta dva mjerna svitka smještena u horizontalnoj osi gdje je zračni raspored jednak za oba svitka. U tablici 5.4 prikazana je maksimalna i efektivna vrijednost napona koja je dobivena nakon spajanja svitaka Ms1 i Ms3 u protuspoj odnosno primjene metode oduzimanja. Iz tablice se može vidjeti da s porastom iznosa ekscentriciteta raste i vrijednost napona što je i očekivano budući da je taj napon razlika induciranih napona u mjernim svicima pozicioniranih u y osi i međusobno razmaknutih za  $2\tau_p$ . Na osnovi prikazanih vrijednosti, jasno se vidi, da se osim međusobne usporedbe efektivne vrijednosti induciranog napona u mjernim svicima kao dodatni parametar za pouzdano otkrivanje ekscentriciteta može koristiti i razlika napona koja se dobiva ukoliko se primjeni metodologija opisana u poglavlju 4.

Tablica 5.3 Efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru dobivene MKE proračunom

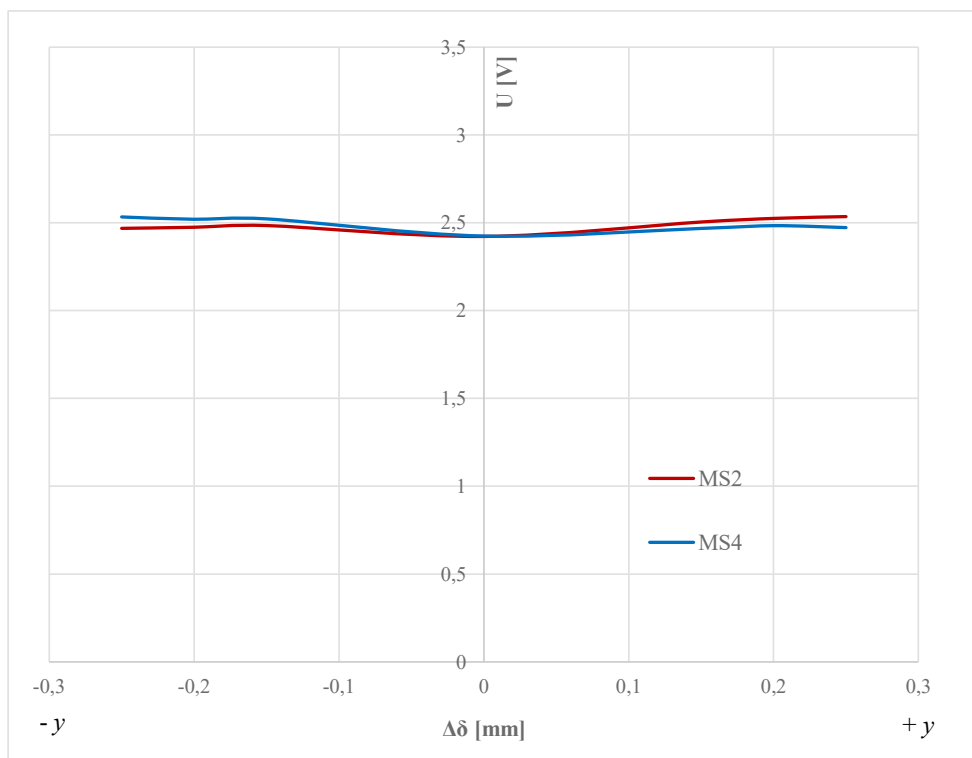
| $\Delta\delta$ [mm] | Smjer pomicanja | MS1 [V] | MS2 [V] | MS3 [V] | MS4 [V] | $\Delta U_{MS1/MS3}[\%]$ |
|---------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------|
| - 0,25              | prema - y       | 2,155   | 2,468   | 3,011   | 2,533   | 39,72                    |
| - 0,20              | prema - y       | 2,213   | 2,475   | 2,894   | 2,520   | 30,74                    |
| - 0,15              | prema - y       | 2,283   | 2,484   | 2,777   | 2,522   | 21,66                    |
| 0,00                | centar          | 2,422   | 2,422   | 2,421   | 2,424   | 0,00                     |
| 0,15                | prema + y       | 2,764   | 2,505   | 2,265   | 2,468   | 22,06                    |
| 0,20                | prema + y       | 2,901   | 2,525   | 2,221   | 2,483   | 30,58                    |
| 0,25                | prema + y       | 3,012   | 2,535   | 2,159   | 2,472   | 39,52                    |

Tablica 5.4 Maksimalna i efektivna vrijednost razlike napona dobivena spajanjem u protuspoj mjernih svitaka Ms1 i Ms3 uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru za različite iznose ekscentriciteta

| $\Delta\delta$ [mm] | Smjer pomicanja | $\Delta U_{\max, \text{MS1-MS3}}$ [V] | $\Delta U_{\text{ef, MS1-MS3}}$ [V] |
|---------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| -0,25               | prema -y        | 2,900                                 | 1,069                               |
| -0,20               | prema -y        | 2,243                                 | 0,832                               |
| -0,15               | prema -y        | 1,460                                 | 0,594                               |
| 0,15                | prema +y        | 1,655                                 | 0,613                               |
| 0,20                | prema +y        | 2,343                                 | 0,834                               |
| 0,25                | prema +y        | 3,000                                 | 1,070                               |

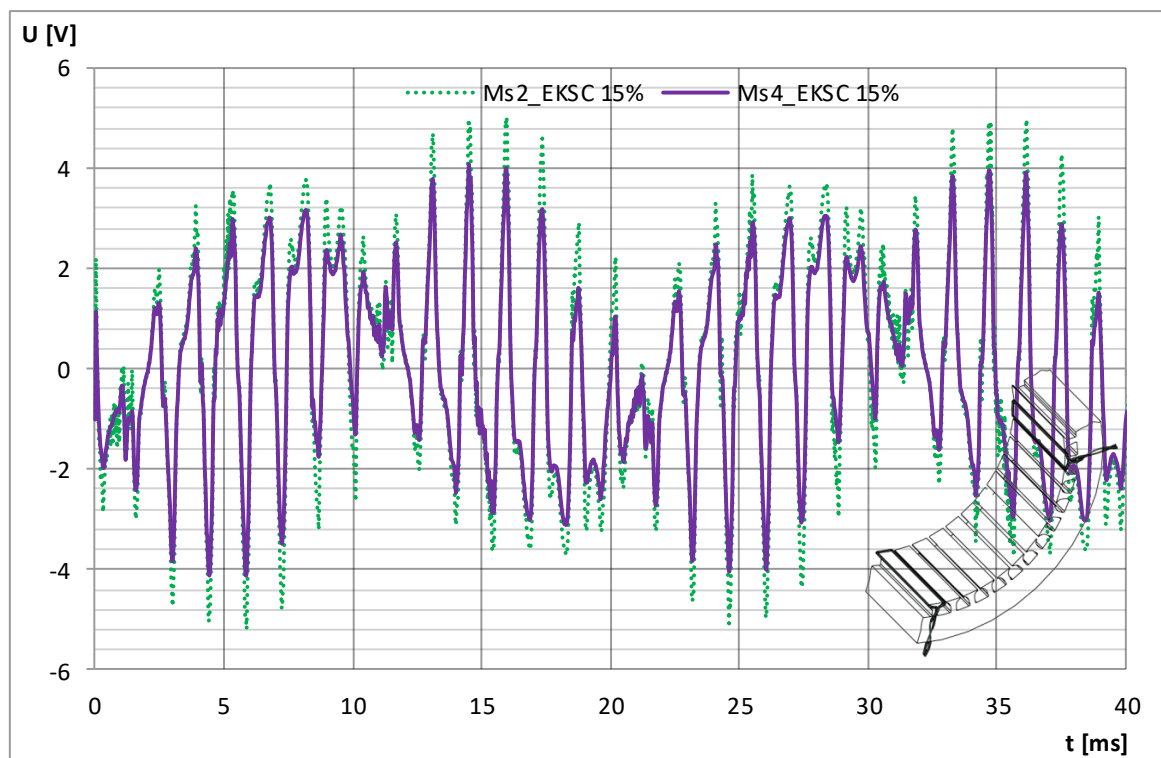


Slika 5.30 Promjena efektivne vrijednosti induciranog napona u Ms1 i Ms3 uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta

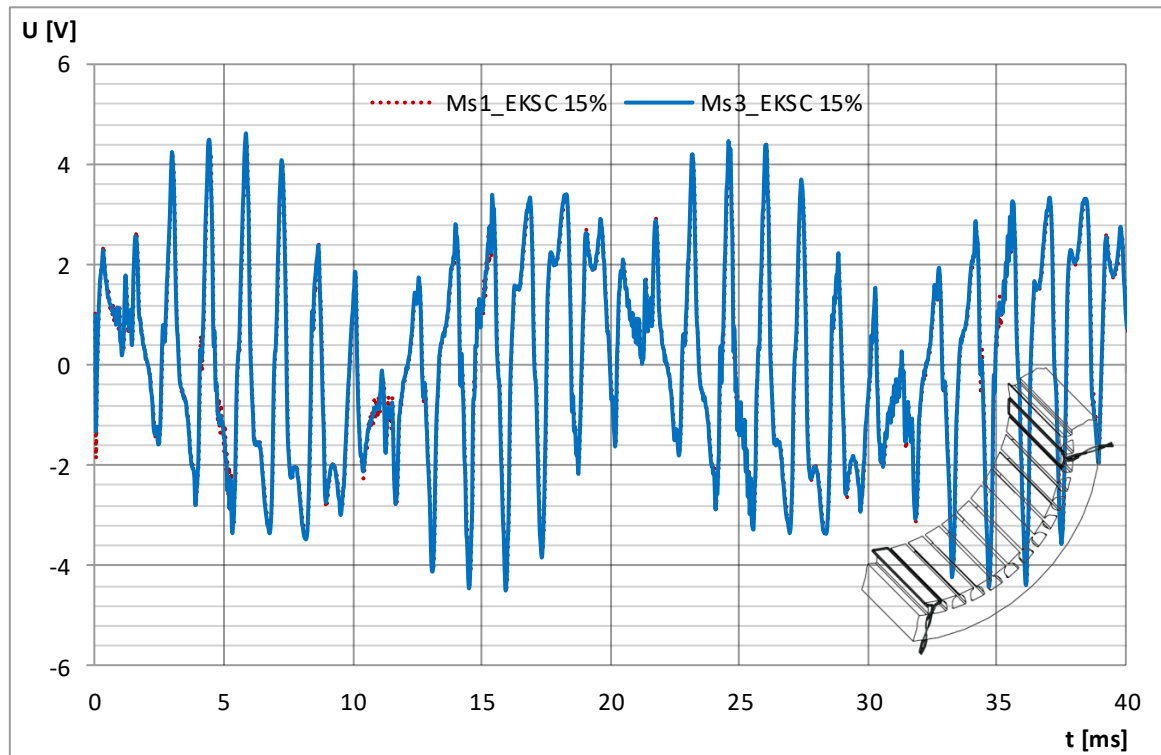


Slika 5.31 Promjena efektivne vrijednosti induciranog napona u Ms2 i Ms4 uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta

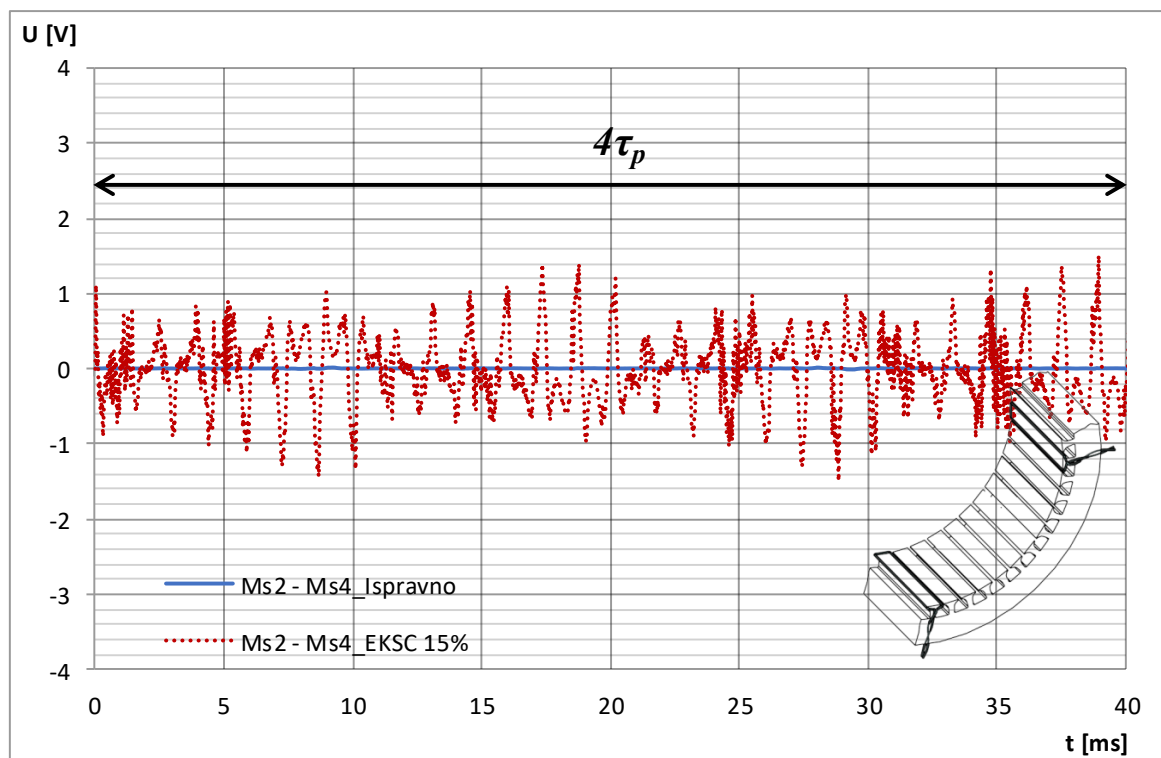
U ovom dijelu potpoglavlja prikazani su rezultati MKE proračuna za slučaj pomicanja rotora u pozitivnom i negativnom smjeru  $x$  osi. Slika 5.32 prikazuje usporedbu induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,15 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $+x$  osi. Na slici 5.33 prikazana je usporedba induciranog napona u Ms1 i Ms3, a na slici 5.34 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4.



Slika 5.32 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru + x osi)

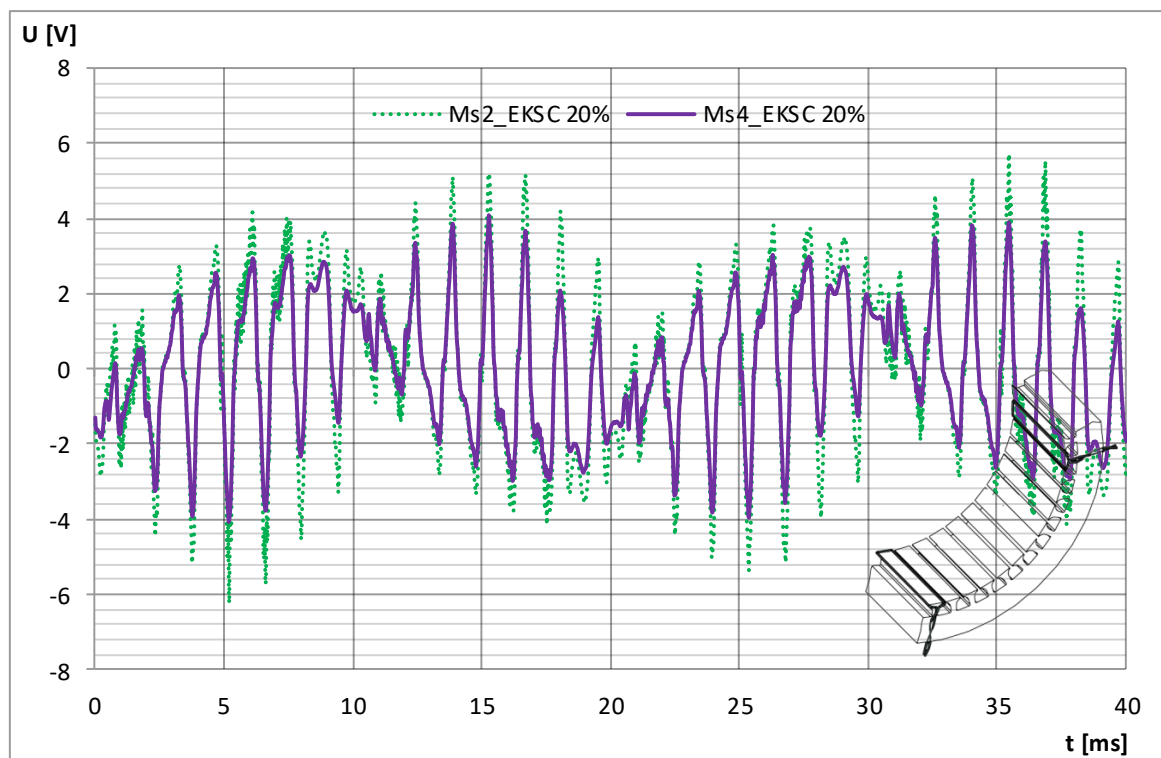


Slika 5.33 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru + x osi)

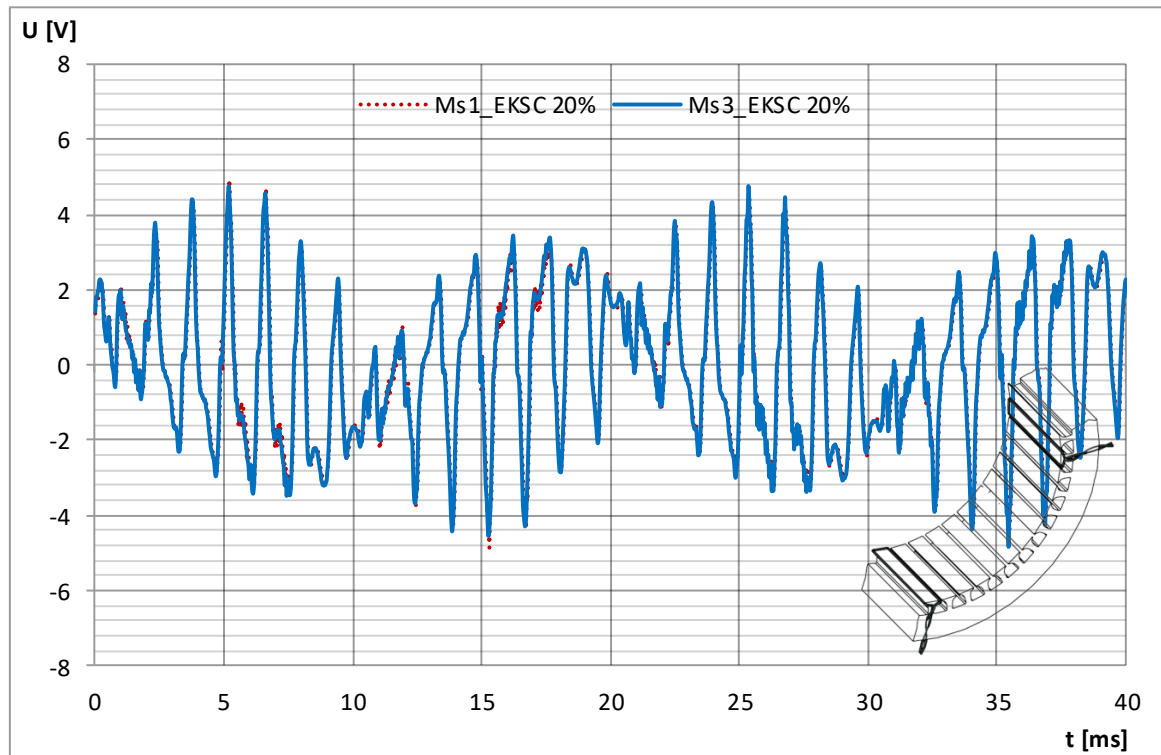


Slika 5.34 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %)

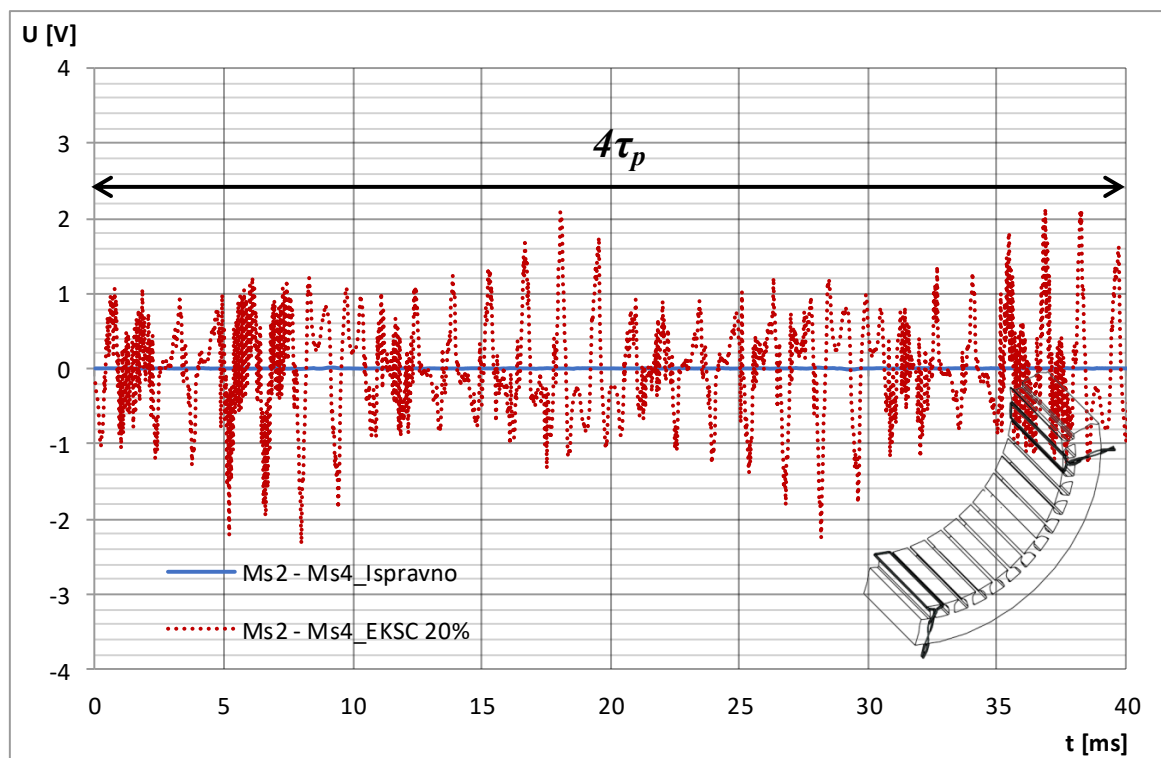
Slika 5.35 prikazuje usporedbu inducirano napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog rasporeda (što odgovara pomaku od 0,20 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $+x$  osi. Na slici 5.36 prikazana je usporedba inducirano napona u Ms1 i Ms3, a na slici 5.37 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem inducirano napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4.



Slika 5.35 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima  $Ms2$  i  $Ms4$  prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru + x osi)

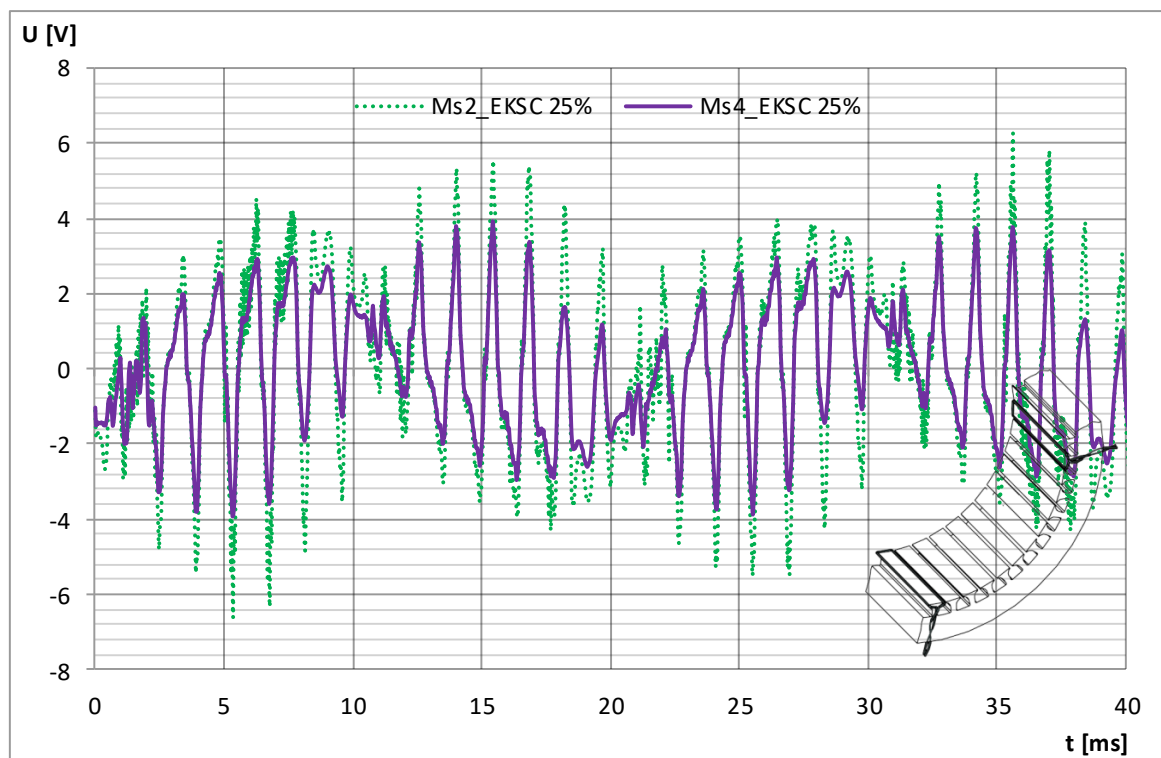


Slika 5.36 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima  $Ms1$  i  $Ms3$  prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru + x osi)

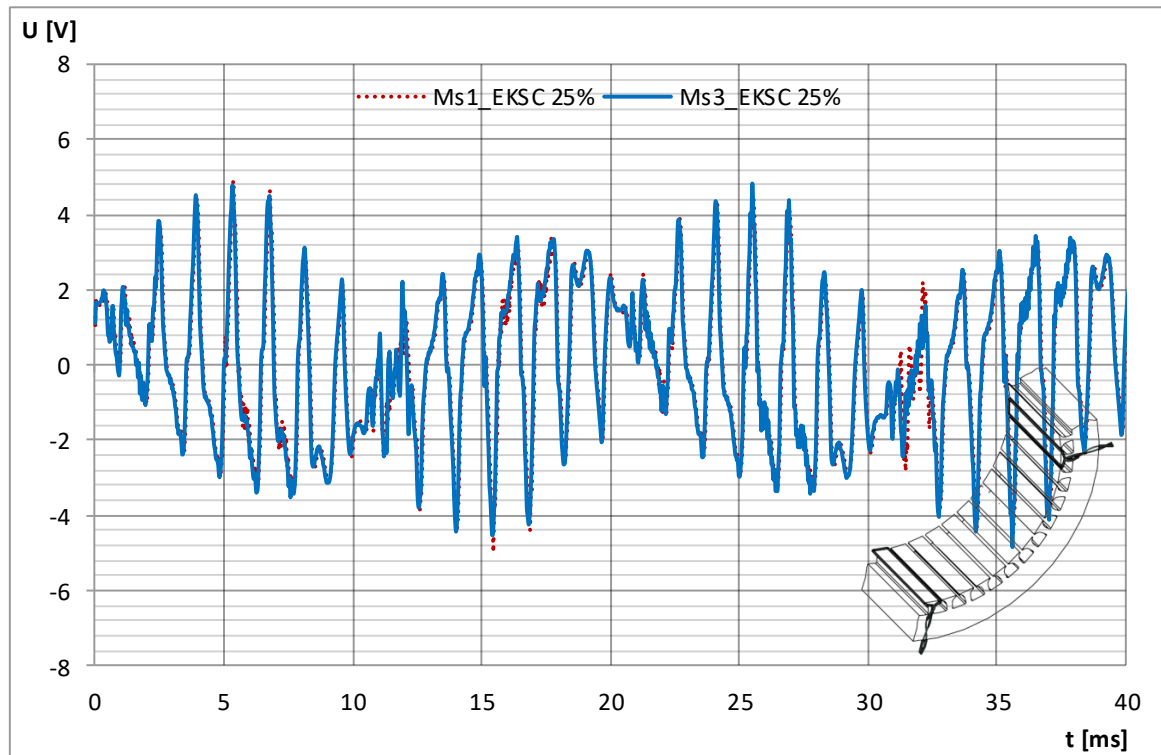


Slika 5.37 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %)

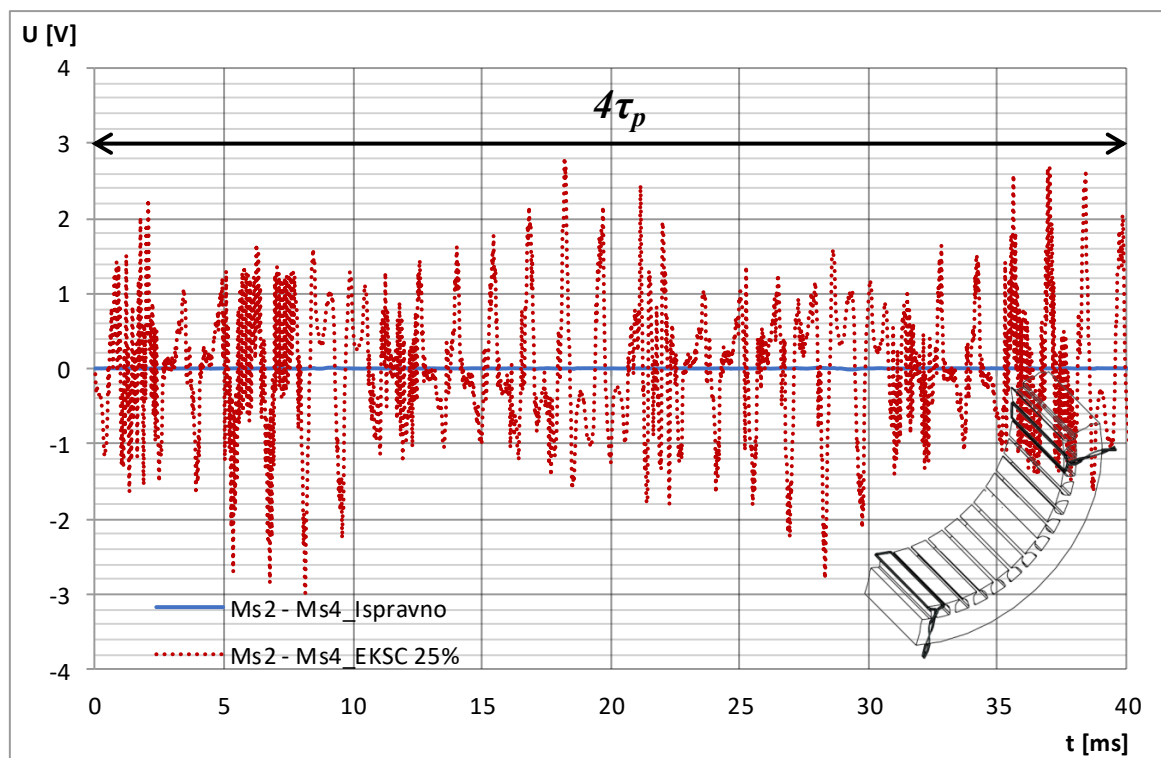
Slika 5.38 prikazuje usporedbu induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,25 mm) i pomicanja rotora u smjeru + x osi. Na slici 5.39 prikazana je usporedba induciranih napona u Ms1 i Ms3, a na slici 5.40 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4.



Slika 5.38 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $+x$  osi)

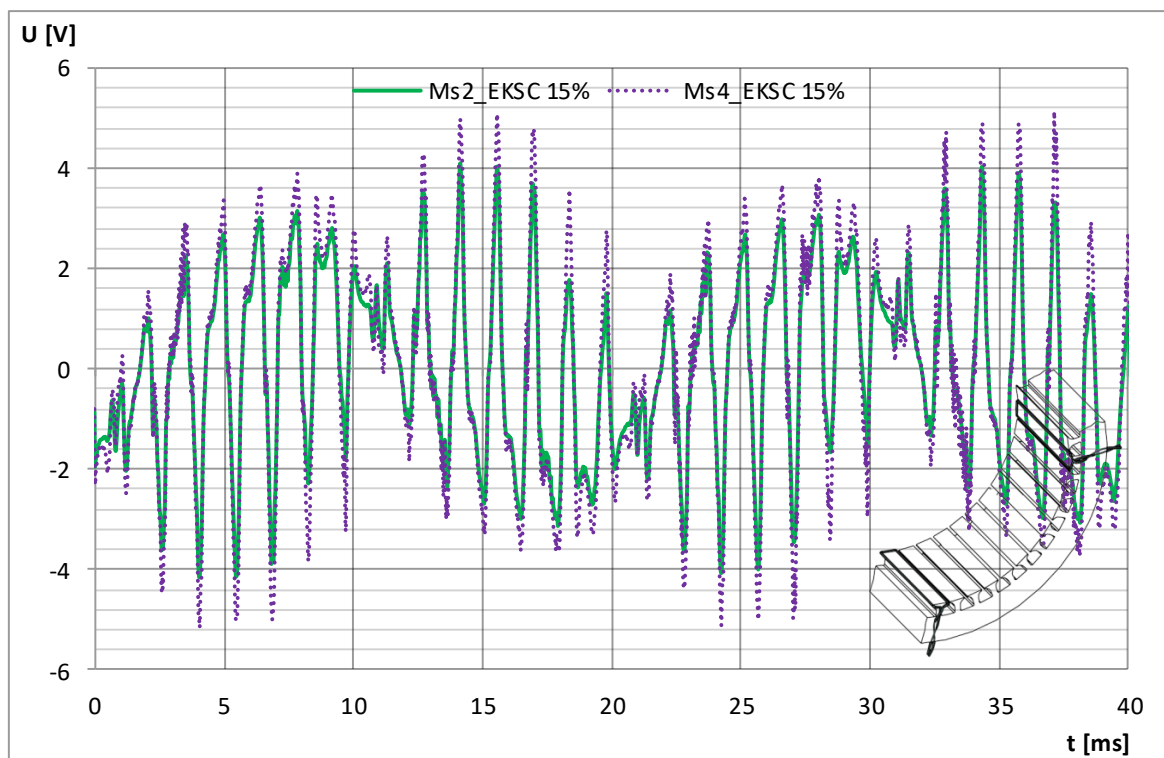


Slika 5.39 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $+x$  osi)

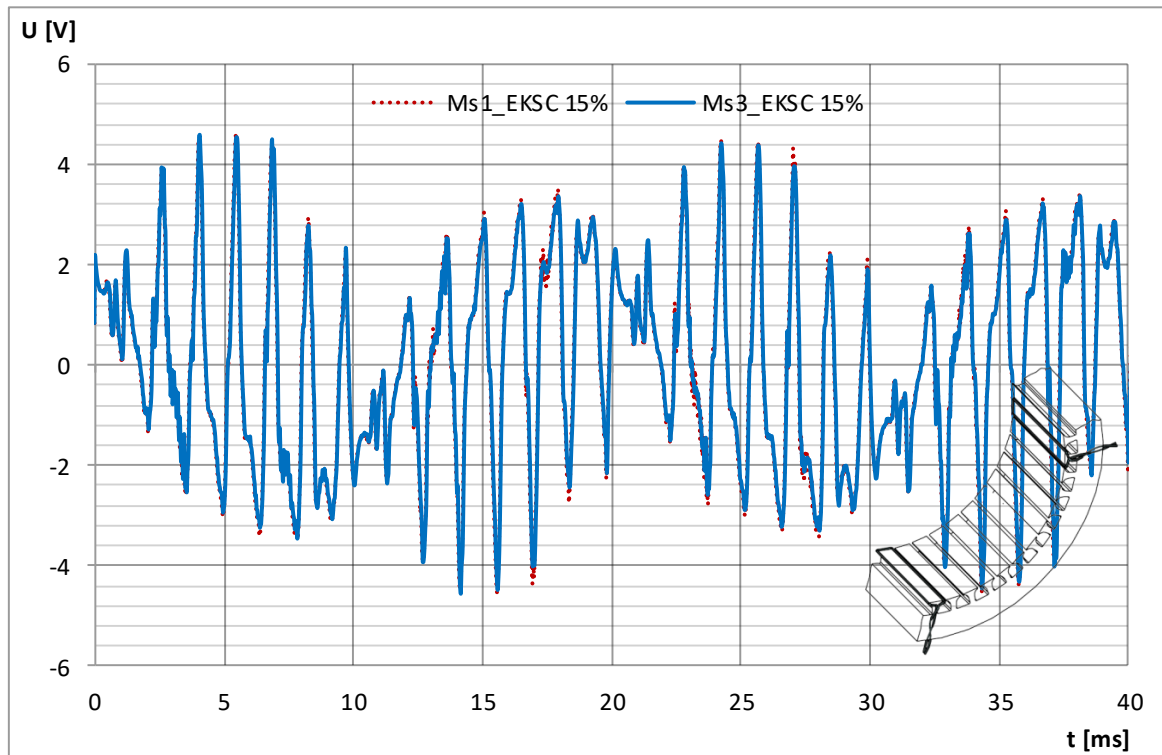


Slika 5.40 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %)

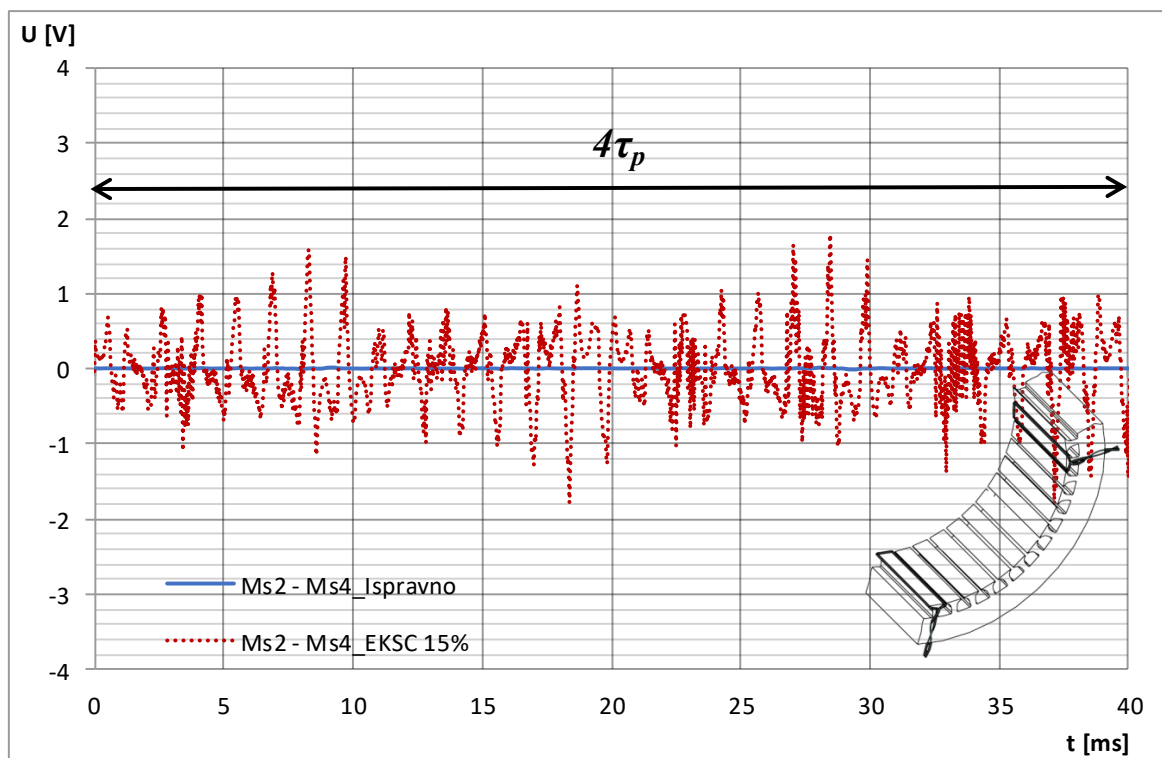
Slika 5.41 prikazuje usporedbu induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,15 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $-x$  osi. Na slici 5.42 prikazana je usporedba induciranih napona u Ms1 i Ms3, a na slici 5.43 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4.



Slika 5.41 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-x$  osi)

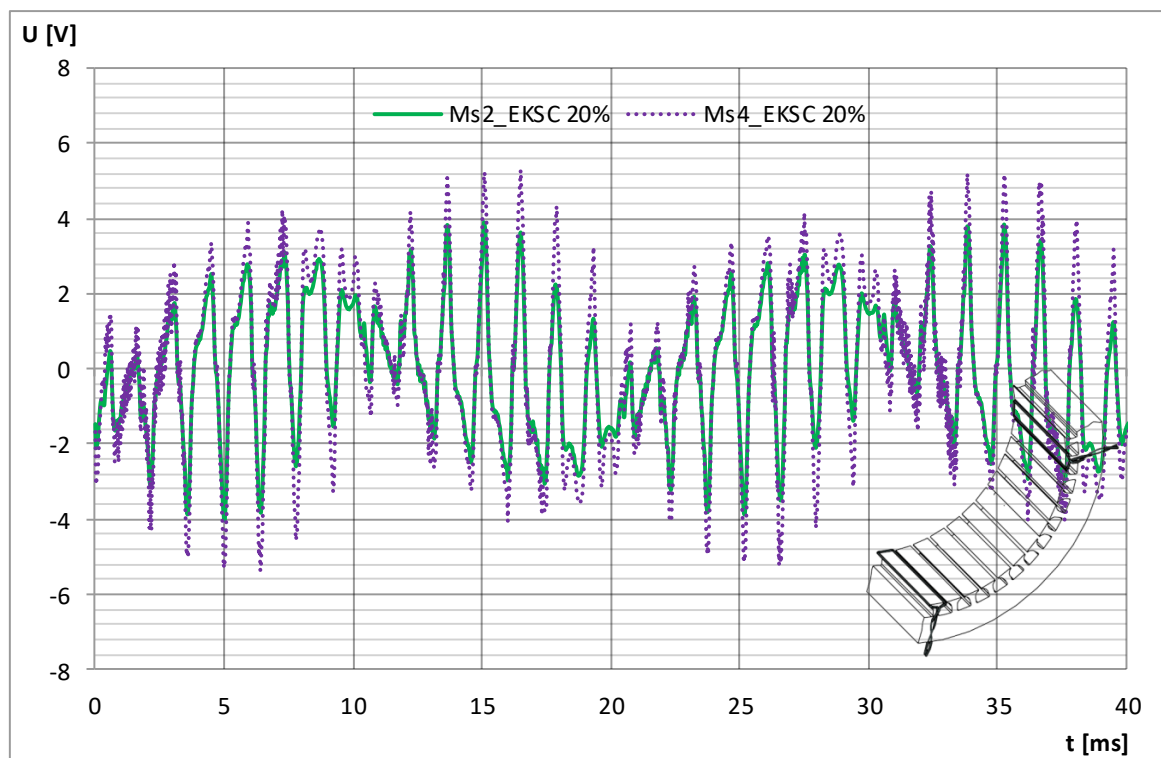


Slika 5.42 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-x$  osi)

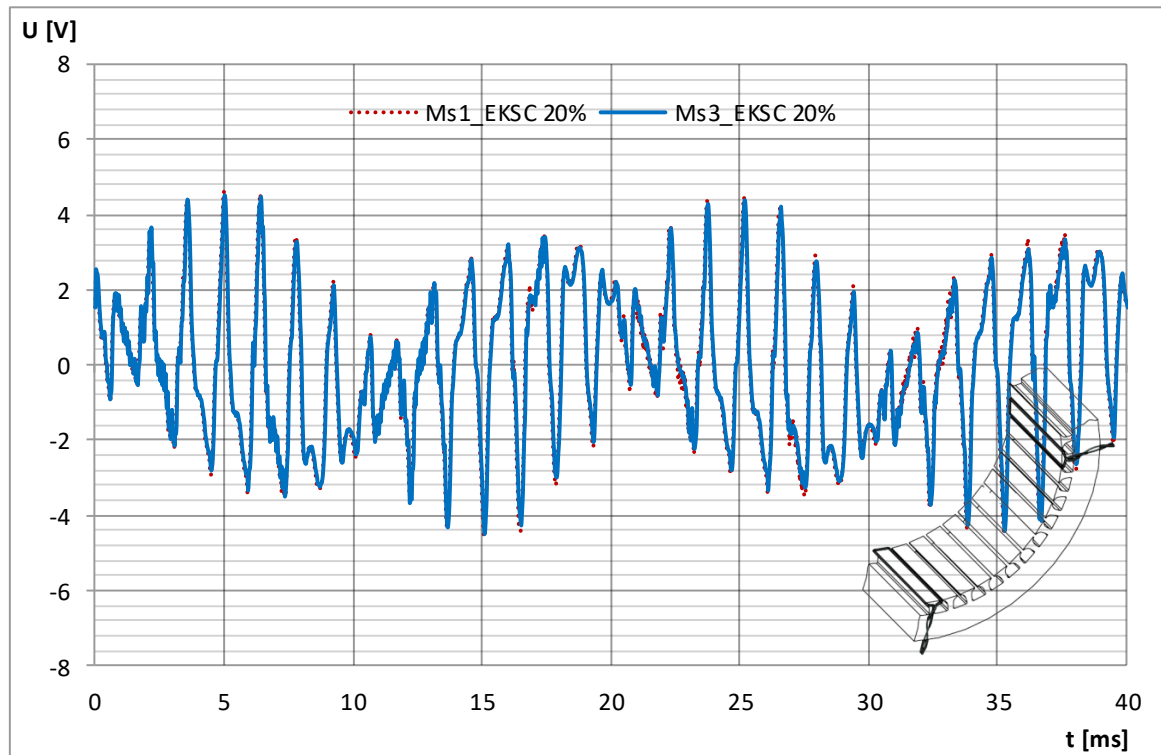


Slika 5.43 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %)

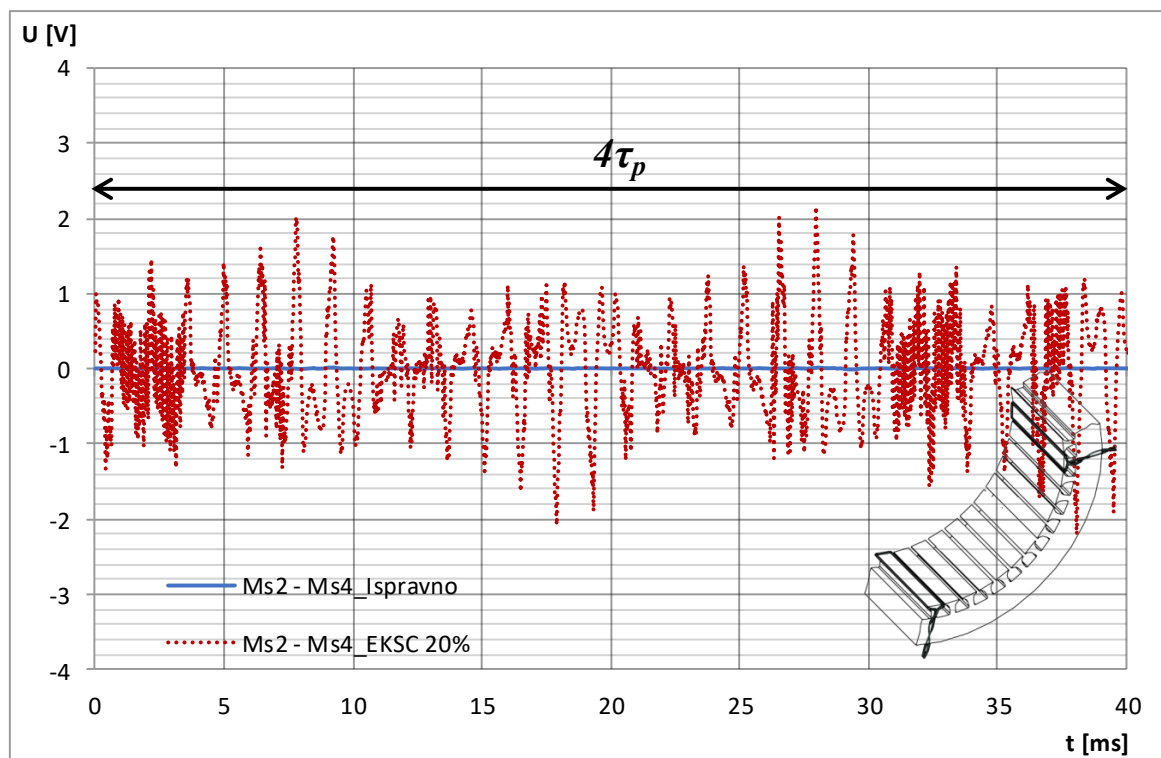
Slika 5.44 prikazuje usporedbu induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog rasporeda (što odgovara pomaku od 0,20 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $-x$  osi. Na slici 5.45 prikazana je usporedba induciranih napona u Ms1 i Ms3, a na slici 5.46 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4.



Slika 5.44 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima  $Ms2$  i  $Ms4$  prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-x$  osi)

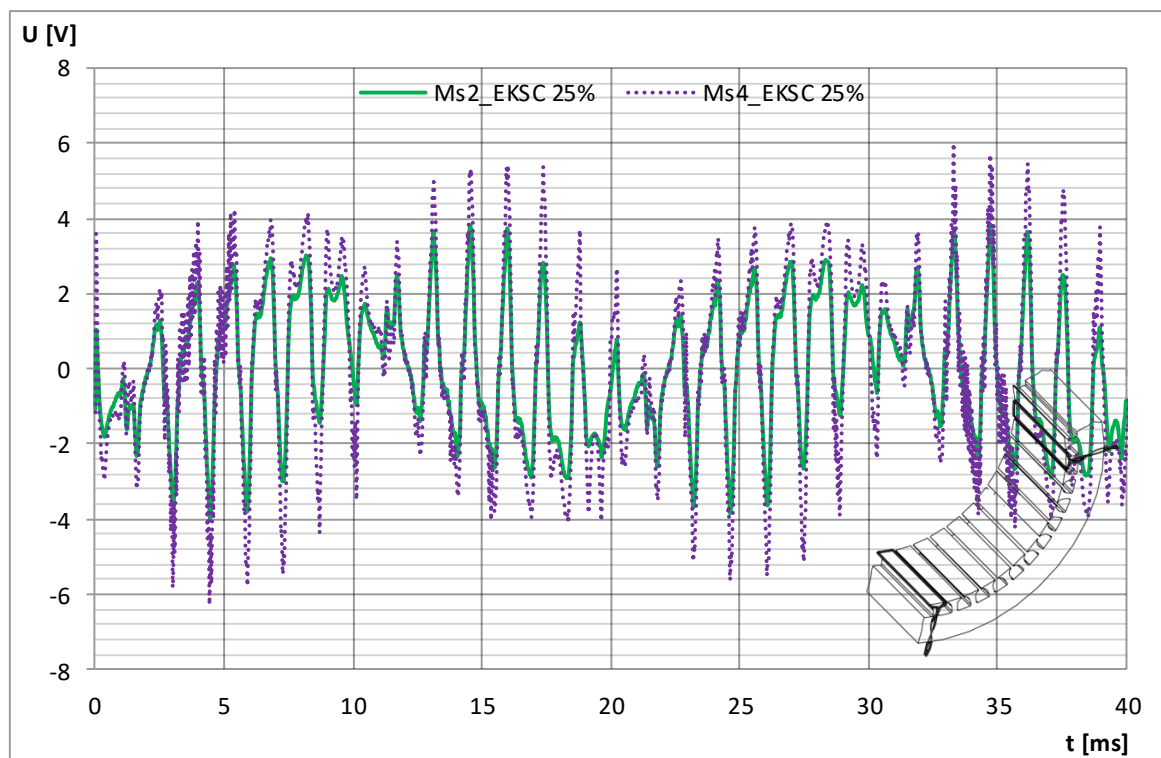


Slika 5.45 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima  $Ms1$  i  $Ms3$  prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-x$  osi)

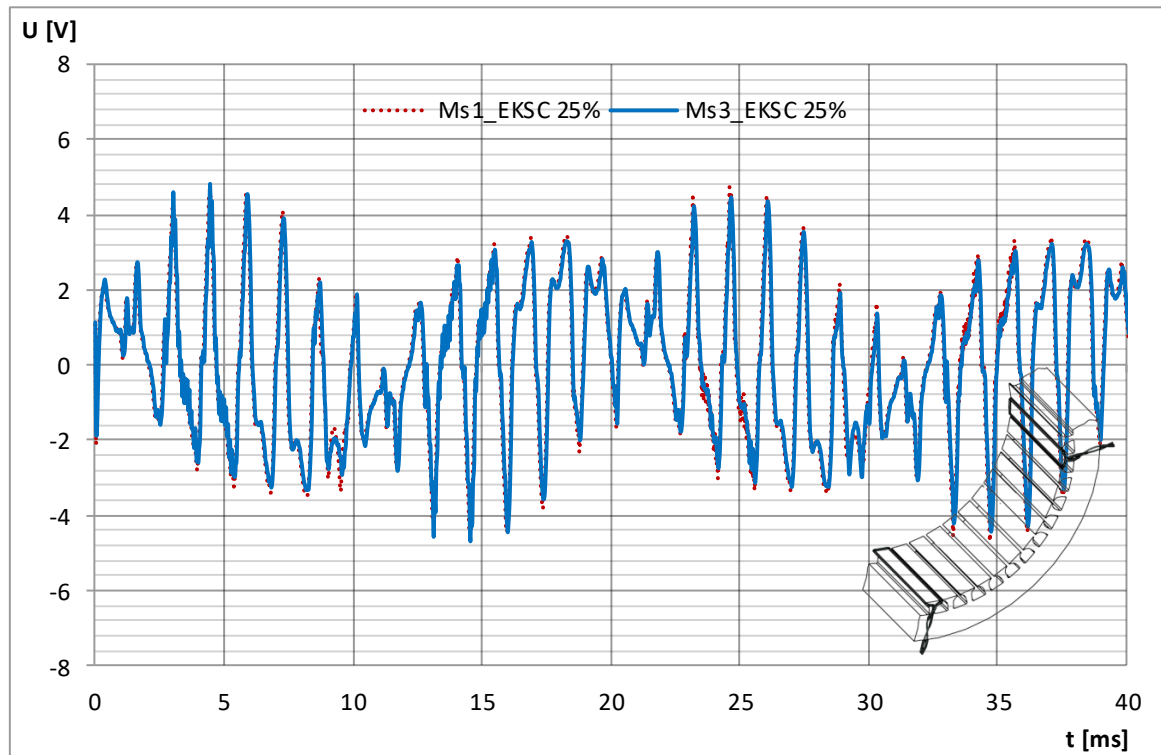


Slika 5.46 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %)

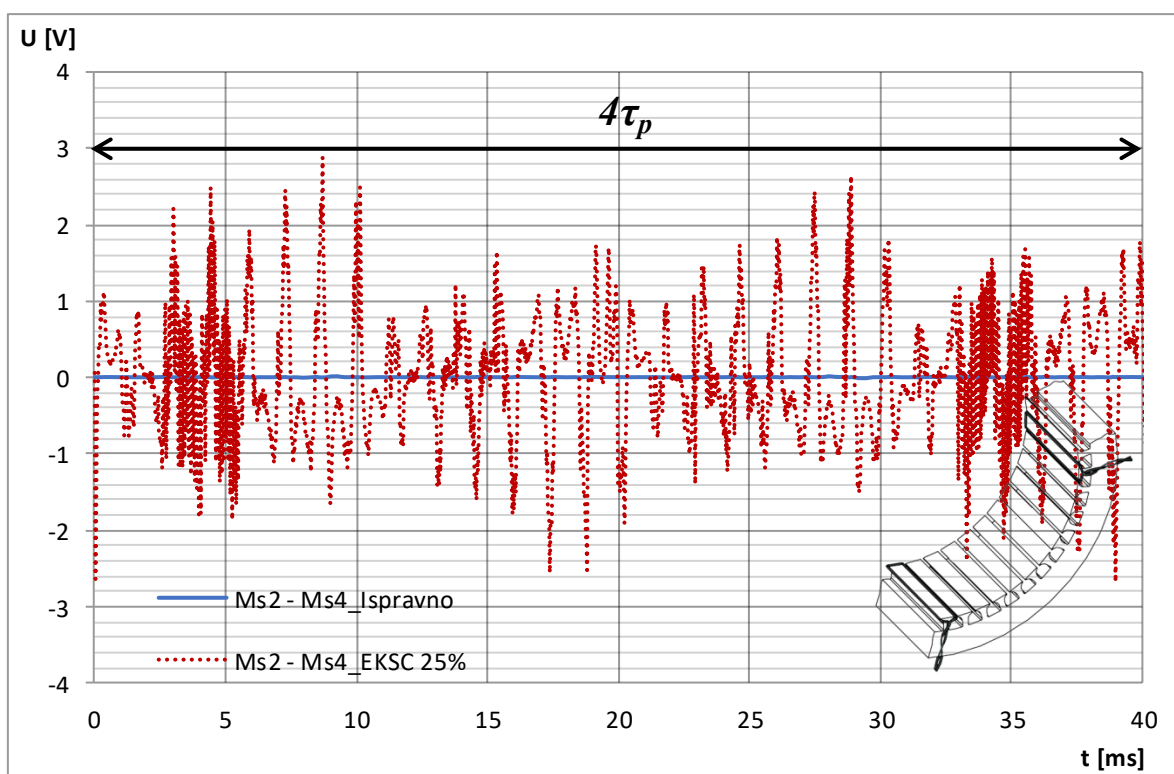
Slika 5.47 prikazuje usporedbu induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog rasporeda (što odgovara pomaku od 0,25 mm) i pomicanja rotora u smjeru  $-x$  osi. Na slici 5.48 prikazana je usporedba induciranih napona u Ms1 i Ms3, a na slici 5.49 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4.



Slika 5.47 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-x$  osi)



Slika 5.48 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru  $-x$  osi)



Slika 5.49 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %)

U tablici 5.5 navedene su efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 dobivene proračunom uslijed pomicanja rotora u horizontalnom smjeru. Vrijednosti su dobivene za pomicanje rotora za iznos 15 %, 20 % i 25 % zračnog raspora u pozitivnom i negativnom smjeru  $x$  osi. Analogno, zaključci i razmatranja koja su provedena za slučaj pomicanja po  $y$  osi vrijede i za slučaj pomicanja rotora po  $x$  osi. Budući da se najveća promjena induciranih napona sada očituju u mjernim svicima Ms2 i Ms4, u tablici 5.5 (posljednji stupac) prikazano je postotno odstupanje upravo između napona ta dva svitka. Primjerice, za analizirani slučaj statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka u smjeru  $+x$ , napon koji se inducira u Ms2 je za 39 % veći u odnosu na inducirani napon u Ms4 što u odnosu na ispravno stanje (naponi simetrični i identični) predstavlja značajno odstupanje. Iako su rezultati identični kao i za slučaj pomicanja po  $y$  osi, postavlja se pitanje opravdanosti provedbe ove analize. Međutim, zbog potrebe za izradom krivulje ovisnosti induciranih napona u mjernim svicima o pomaku rotora u horizontalnom smjeru te kasnije validacije i usporedbe s rezultatima mjerenja provedena je MKE analiza pomicanja rotora po  $x$  osi. Tako je na osnovi podataka iz tablice 5.5 izrađena krivulja ovisnosti induciranih napona u mjernim svicima o pomaku rotora u horizontalnom smjeru. Slika 5.50 prikazuje promjenu induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 u ovisnosti o promjeni položaja rotora u horizontalnom

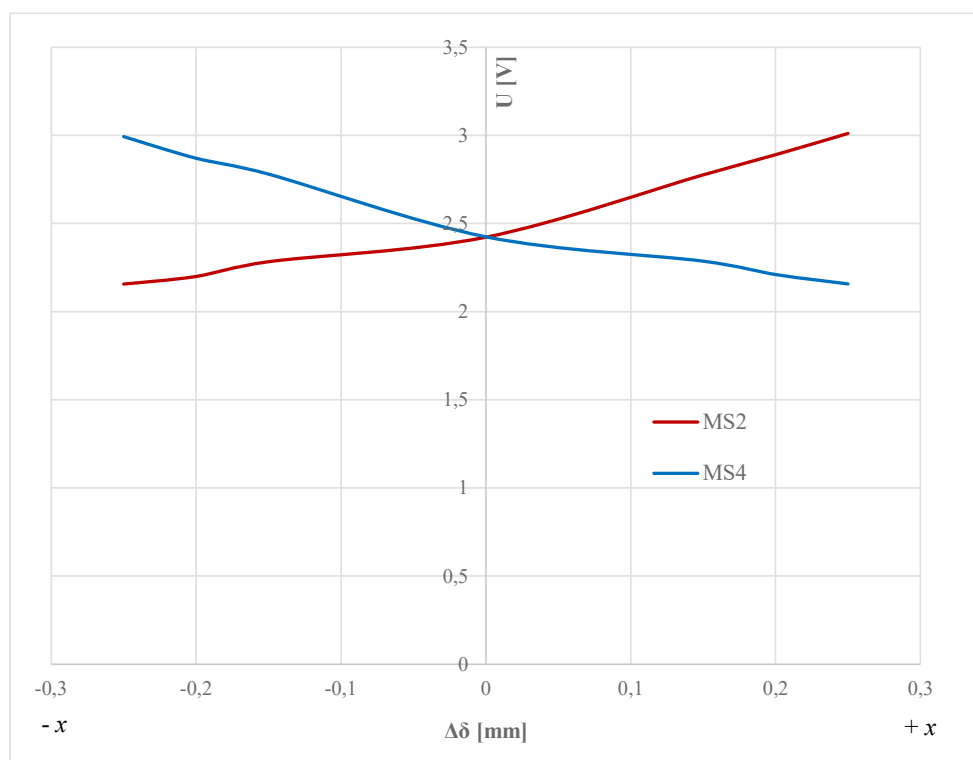
smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta. Na slici 5.50 jasno se može vidjeti promjena induciranog napona u svitku Ms2 od njegove maksimalne vrijednosti (rotor najbliži) do njegove minimalne vrijednosti (rotor najudaljeniji). Analogno, situacija vrijedi i za mjerni svitak Ms4 u kojem se događa ista promjena induciranog napona kako se rotor približava ili udaljava od tog svitka. Slika 5.51 prikazuje promjenu induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ovisnosti o promjeni položaja rotora u horizontalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta. Iz slike 5.51 jasno se vidi da je inducirani napon u svicima Ms1 i Ms3 praktički konstantan i identičan po iznosu, što je i očekivano budući da su ta dva mjerna svitka smještena u vertikalnoj osi gdje je zračni raspor jednak za oba svitka. U tablici 5.6 prikazana je maksimalna i efektivna vrijednost napona koja je dobivena nakon oduzimanja induciranog napona u svicima Ms2 i Ms4. Kao i u slučaju pomicanja rotora po  $y$  osi, sada se iz tablice može vidjeti da i kod pomicanja po  $x$  osi s porastom iznosa ekscentriciteta raste i vrijednost napona, što je i očekivano budući da je taj napon razlika induciranih napona u mjernim svicima pozicioniranih u  $x$  osi i međusobno razmaknutih za  $2\tau_p$ . To ponovno pokazuje da osim međusobne usporedbe efektivne vrijednosti induciranog napona u mjernim svicima kao dodatni parametar za pouzdano otkrivanje ekscentriciteta može se koristiti i razlika napona koja se dobiva ukoliko se primijeni metodologija opisana u poglavlju 4.

Tablica 5.5 Efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru dobivene MKE proračunom

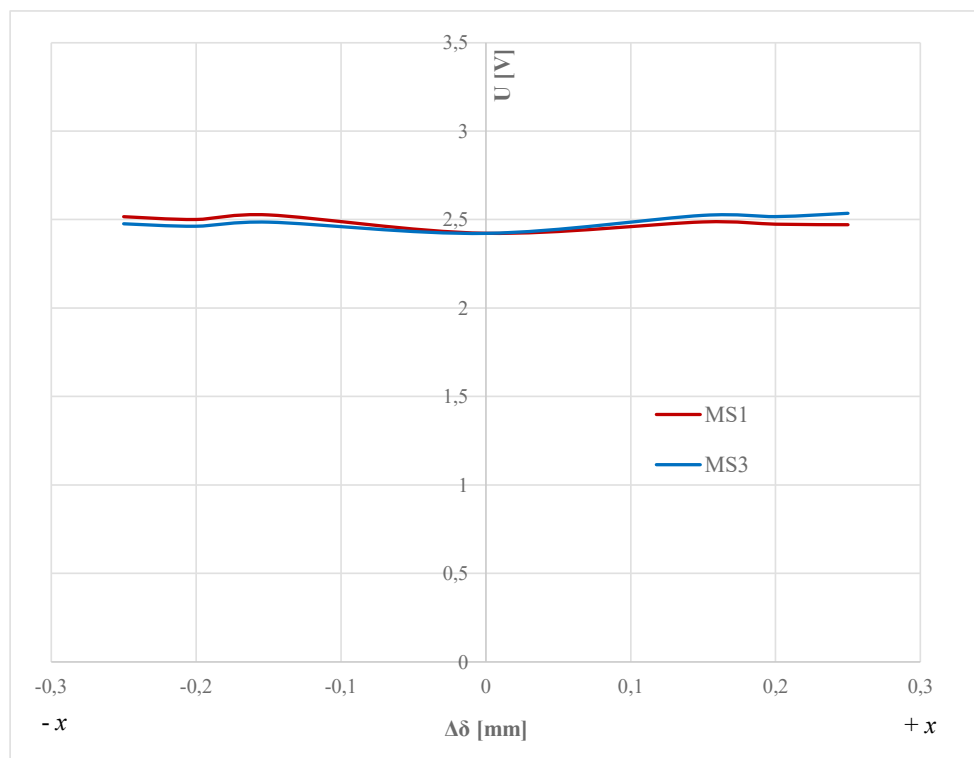
| $\Delta\delta$ [mm] | Smjer pomicanja | MS1 [V] | MS2 [V] | MS3 [V] | MS4 [V] | $\Delta U_{MS2/MS4}[\%]$ |
|---------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------|
| - 0,25              | prema - $x$     | 2,516   | 2,156   | 2,476   | 2,993   | 38,80                    |
| - 0,20              | prema - $x$     | 2,500   | 2,199   | 2,462   | 2,870   | 30,49                    |
| - 0,15              | prema - $x$     | 2,526   | 2,283   | 2,485   | 2,780   | 21,77                    |
| 0,00                | centar          | 2,422   | 2,422   | 2,421   | 2,424   | 0,00                     |
| 0,15                | prema + $x$     | 2,486   | 2,775   | 2,523   | 2,286   | 21,40                    |
| 0,20                | prema + $x$     | 2,474   | 2,890   | 2,516   | 2,211   | 30,75                    |
| 0,25                | prema + $x$     | 2,471   | 3,011   | 2,535   | 2,157   | 39,56                    |

Tablica 5.6 Maksimalna i efektivna vrijednost razlike napona dobivena spajanjem u protuspoj mjernih svitaka Ms2 i Ms4 uslijed pomicanja rotora u horizontalnom smjeru za različite iznose ekscentriciteta

| $\Delta\delta$ [mm] | Smjer pomicanja | $\Delta U_{\max, \text{Ms2-Ms4}}$ [V] | $\Delta U_{\text{ef, Ms2-Ms4}}$ [V] |
|---------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| -0,25               | prema $-x$      | 2,887                                 | 1,059                               |
| -0,20               | prema $-x$      | 1,991                                 | 0,811                               |
| -0,15               | prema $-x$      | 1,596                                 | 0,598                               |
| 0,15                | prema $+x$      | 1,394                                 | 0,585                               |
| 0,20                | prema $+x$      | 2,083                                 | 0,831                               |
| 0,25                | prema $+x$      | 2,798                                 | 1,069                               |



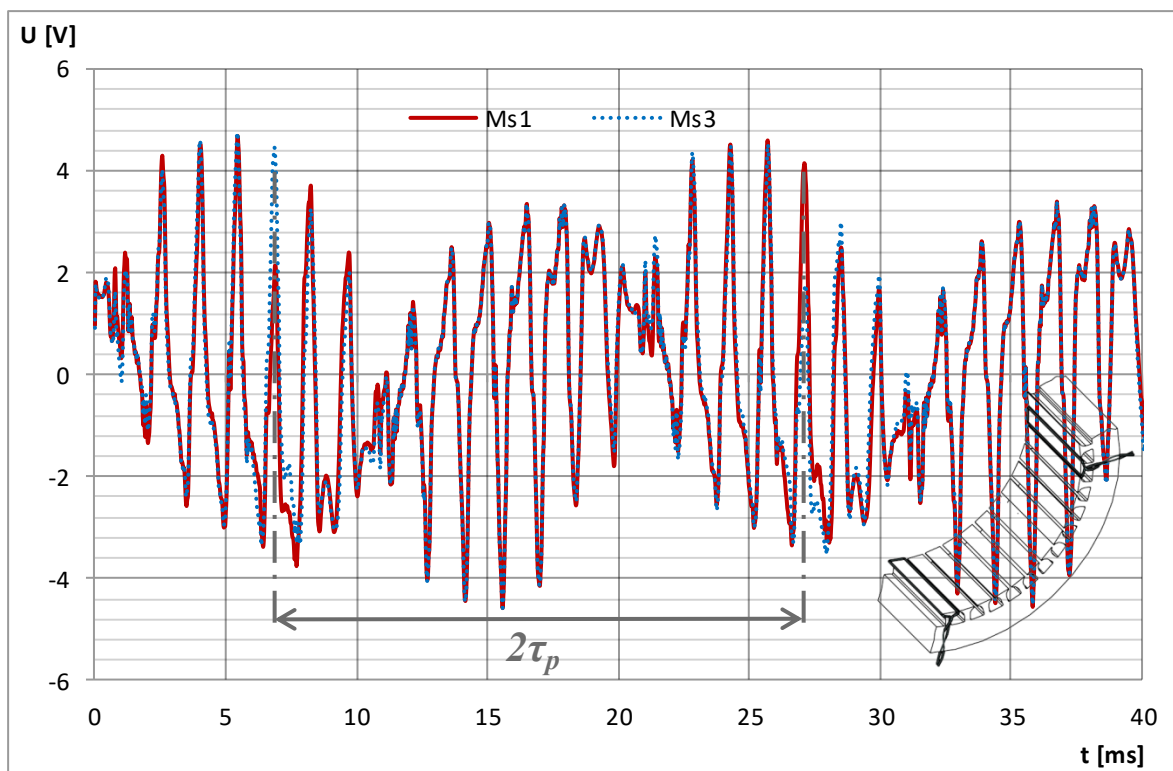
Slika 5.50 Usporedba promjene efektivne vrijednosti induciranog napona u Ms2 i Ms4 uslijed pomicanja rotora u horizontalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta



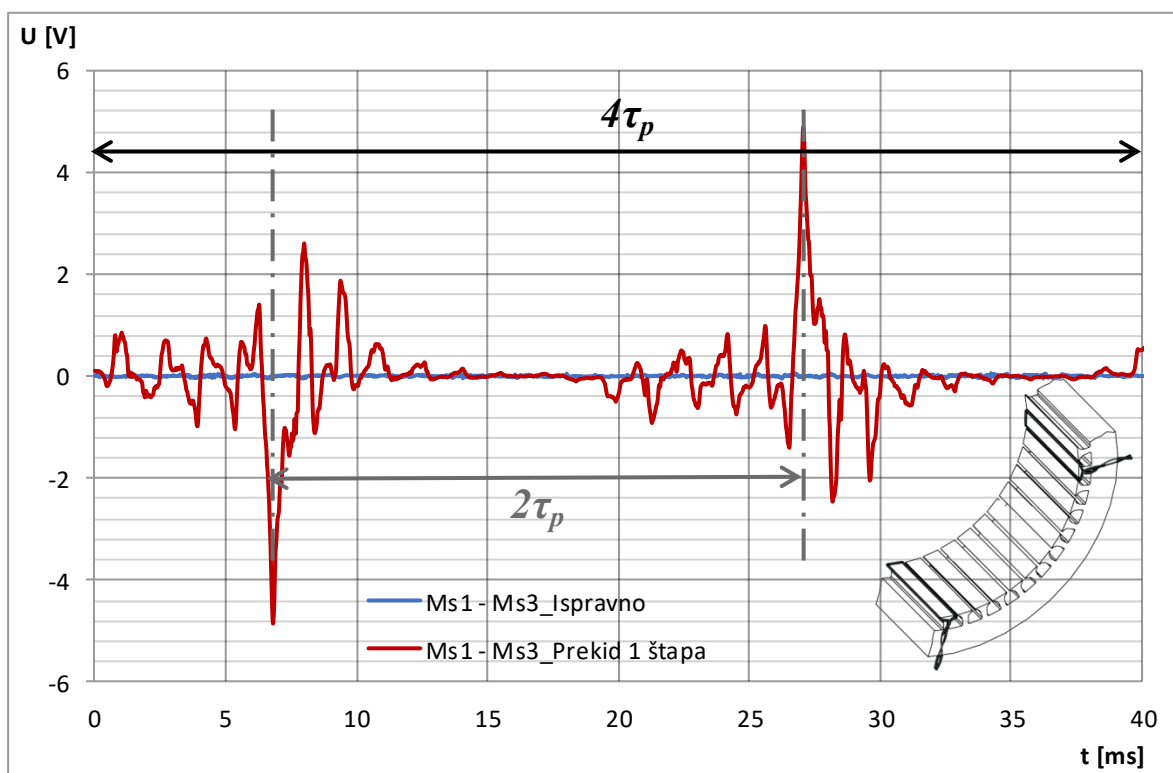
Slika 5.51 Usporedba promjene efektivne vrijednosti induciranog napona u Ms1 i Ms3 uslijed pomicanja rotora u horizontalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta

### 5.3.2. Utjecaj prekida jednog i više štapova kaveznog namota na inducirane napone u mjernim svicima

U ovom dijelu prikazani su rezultati numeričkih proračuna dobiveni za slučaj kada je na rotoru prekinut jedan štap kaveznog namota. Slika 5.52 prikazuje inducirani napon u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su razmaknuti za  $2\tau_p$ , kod prekida jednog štapa rotora. Kada bi se analizirali samo inducirani naponi, teško bi bilo zaključiti samo na osnovu valnog oblika postoji li prekid štapa ili ne. Ukoliko se primjeni metoda oduzimanja induciranih napona, kao što je opisano u poglavlju 4 i to na način prikladan za mjerne svitke razmaknute za  $2\tau_p$ , tada se dobiva valni oblik kakav je prikazan na slici 5.53. Na slici 5.53 uočavaju se za jedan okret stroja dva karakteristična porasta napona koja upućuju na prekid štapa kaveza. Ta dva porasta napona dobivena oduzimanjem induciranih napona u Ms1 i Ms3 međusobno su udaljena za  $2\tau_p$ , što je naznačeno na slici. Na slici je dan prikaz razlike napona za jedan puni okret stroja ( $4\tau_p$ ) te su stoga vidljiva dva karakteristična porasta napona.

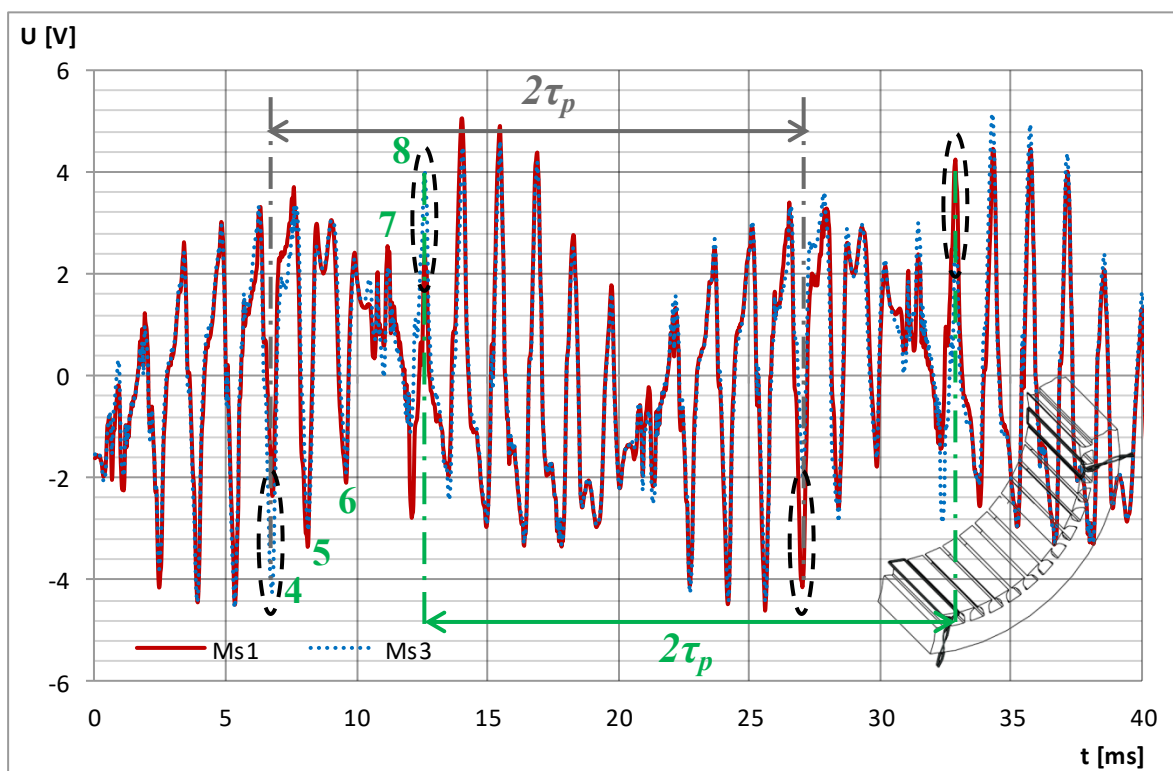


Slika 5.52 Valni oblik inducirano napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod prekida jednog štapa kaveza rotora



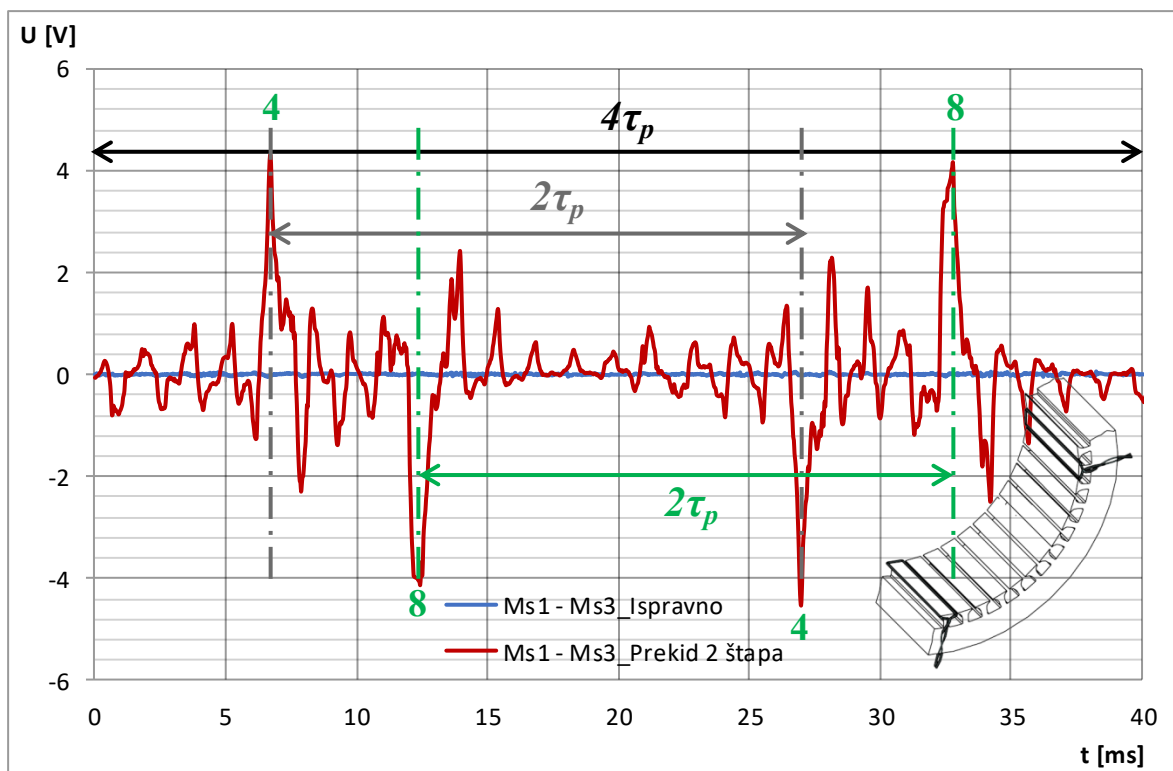
Slika 5.53 Razlika napona dobivena serijskim protuspajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$ ) kod prekida jednog štapa kaveza rotora

Sljedeći kvar koji je simuliran MKE modelom, a tiče se oštećenja kaveznog namota na rotoru je prekid dva štapa. Na modelu motora u električnom krugu odabrani su za prekid štapići broj 4 i broj 8. Na slici 5.54 prikazan je inducirani napon u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su međusobno razmaknuti za  $2\tau_p$ , kod prekida dva štapa rotora. Kada bi se analizirali samo inducirani naponi teško bi bilo zaključiti samo na osnovu valnog oblika postoji li prekid više štapića ili ne.



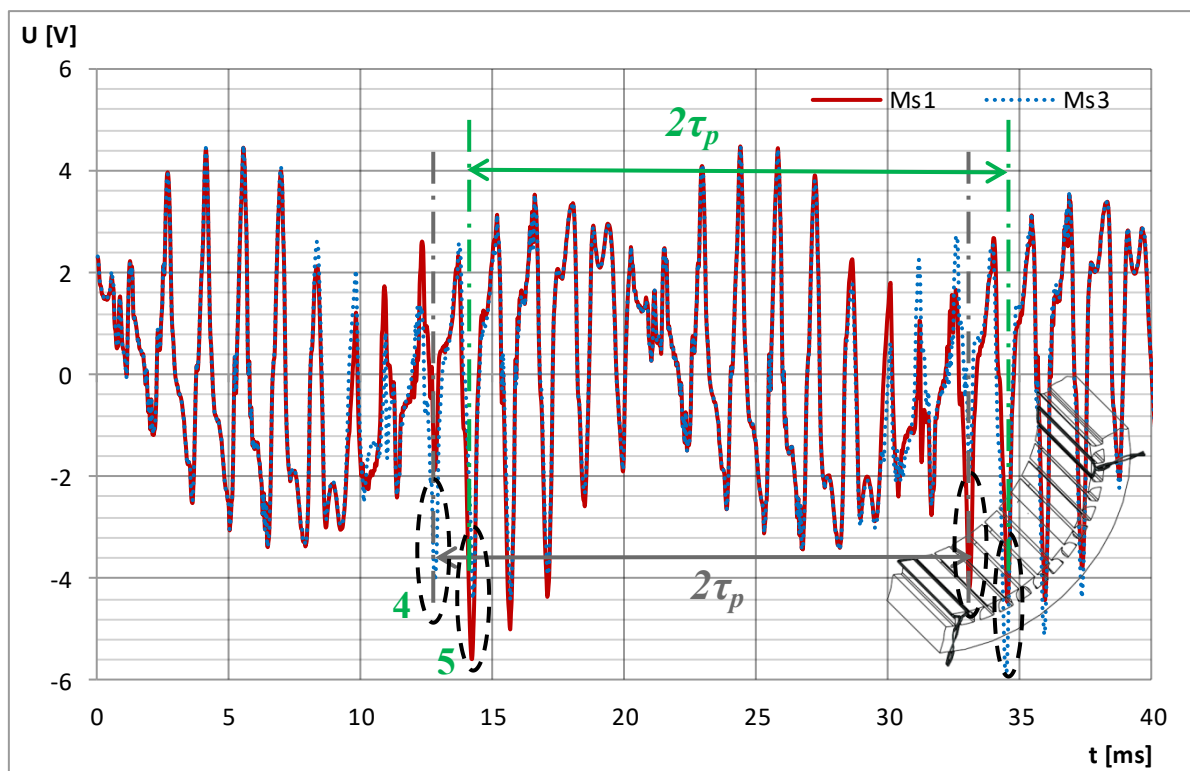
Slika 5.54 Valni oblik induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod prekida dva štapa kaveza rotora

Ukoliko se ponovno primjeni metoda oduzimanja induciranih napona kao što je opisano u poglavlju 4 i to na način prikladan za mjerne svitke razmaknute za  $2\tau_p$  tada se dobiva valni oblik kakav je prikazan na slici 5.55. Na toj se slici uočavaju, za jedan okret stroja, četiri karakteristična porasta napona koja upućuju na prekid dva štapa kaveza. Prema tome, prilikom nailaska prekinutog štapa broj 4 na mjerni svitak Ms1 nastaje prvi porast napona, dok drugi porast nastaje kada na mjerni svitak Ms1 nailazi štap broj 8. Druga dva porasta napona nastaju točno za  $2\tau_p$  kada štapići broj 4 i 8 nailaze na mjerni svitak Ms3. Na slici je dan prikaz razlike napona za jedan puni okret stroja ( $4\tau_p$ ) te su zato vidljiva četiri karakteristična porasta napona.

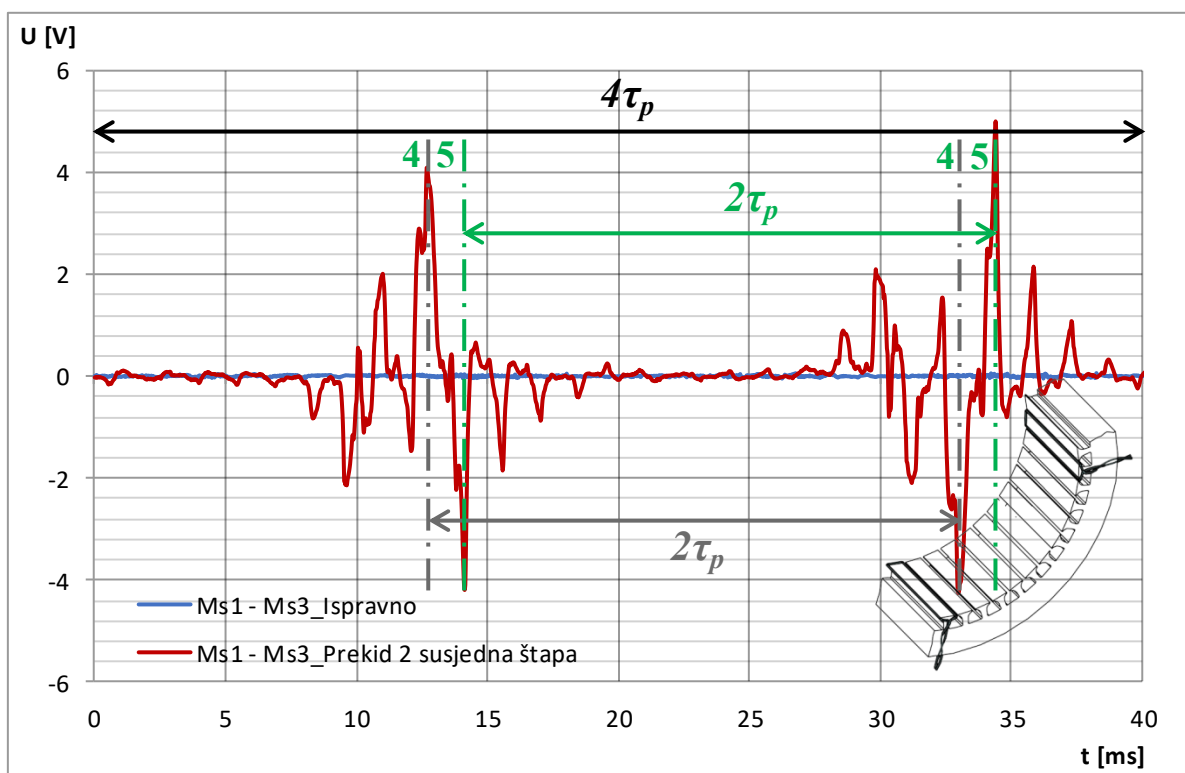


Slika 5.55 Razlika napona dobivena serijskim protuspajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$ ) kod prekida dva štapa kaveza rotora

MKE modelom simuliran je još jedan kvar kaveznog namota, a to je prekid dva susjedna štapa. U električnom krugu modela motora odabrani su za prekid susjedni štapovi broj 4 i 5. Na slici 5.56 prikazan je inducirani napon u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su međusobno razmaknuti za  $2\tau_p$ , za slučaj prekida dva susjedna štapa rotora. Ponovno se može utvrditi da kada bi se analizirali samo inducirani naponi teško bi bilo zaključiti samo na osnovu valnog oblika postoji li prekid štapa ili ne. Primjenom metode oduzimanja induciranih napona dobiva se valni oblik kakav je prikazan na slici 5.57. Na slici se uočavaju za jedan okret stroja, četiri karakteristična porasta napona koja upućuju na prekid dva štapa kaveza. Međutim, zato jer su u prekidu dva susjedna štapa rotora porasti napona su bliski i nalaze se jedan pored drugoga što se može i vidjeti na slici 5.57. Prilikom nailaska prekinutog štapa broj 4 na mjerni svitak Ms1 nastaje prvi porast napona, dok drugi porast nastaje kada na mjerni svitak Ms1 nailazi štap broj 5. Druga dva porasta napona nastaju točno za  $2\tau_p$  kada štapovi broj 4 i 5 nailaze na mjerni svitak Ms3. Na slici je dan prikaz razlike napona za jedan puni okret stroja ( $4\tau_p$ ) te su vidljiva četiri karakteristična porasta napona.



Slika 5.56 Valni oblik inducirano napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod prekida dva susjedna štapa kaveza rotora

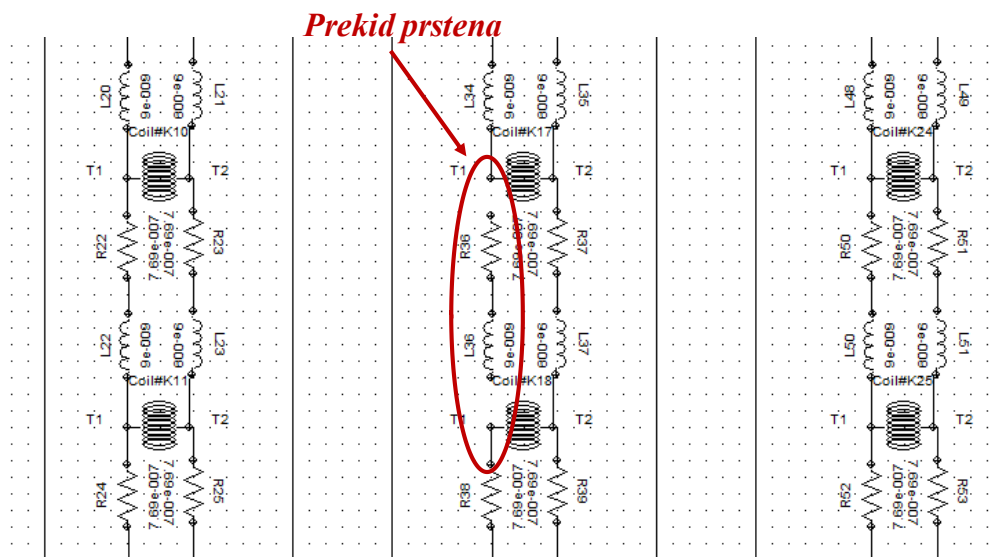


Slika 5.57 Razlika napona dobivena serijskim protuspajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$ ) kod prekida dva susjedna štapa kaveza rotora

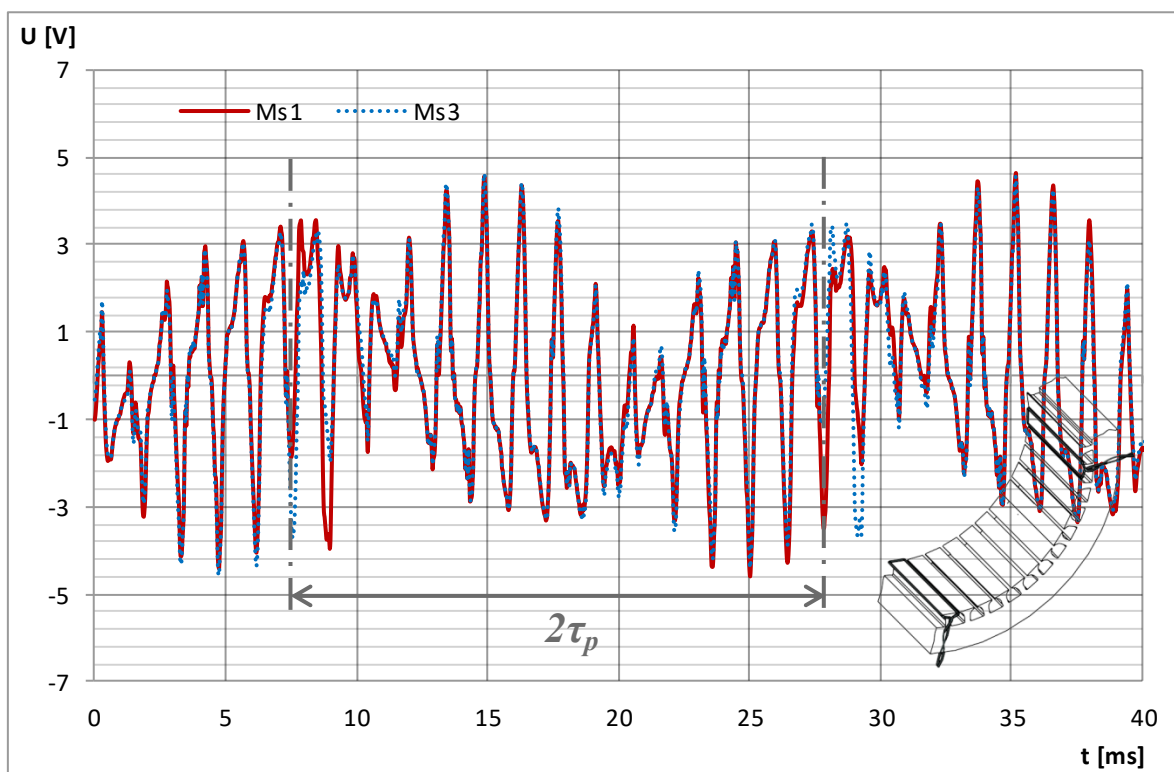
### **5.3.3. Utjecaj prekida prstena kaveznog namota na inducirane napone u mjernim svicima**

Posljednja vrsta kvara rotora koja je zasebno analizirana MKE modelom motora je prekid prstena kaveznog namota. Do prekida prstena u pogonu motora dolazi uslijed električnih, mehaničkih i toplinskih naprezanja kaveznog namota. Sa svrhom pouzdanog otkrivanja ove vrste kvara, proveden je numerički proračun koji uzima u obzir prekid prstena. U MKE modelu, odnosno u nadomjesnoj shemi kojom je predstavljen električni krug kaveznog rotorskog namota prekinuta je jedna električna spojna veza između dva štapa koja ustvari predstavlja dio segmenta prstena. Na slici 5.58 prikazana je shema spoja kaveznog namota gdje je između dvaju štapova rotora izvršen prekid segmenta prstena. Takvom izmjenom u električnom krugu kaveznog namota omogućena je provedba proračuna za prekid prstena. Na izračunate valne oblike induciranih napona ponovno je primijenjena metoda koja se zasniva na analizi induciranih napona u mjernim svicima smještenim na zub statora s rasporedom svitaka prema slici 5.5. Slika 5.59 prikazuje inducirani napon u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su međusobno razmaknuti za dvostruki polni korak,  $2\tau_p$ . Ukoliko bi se uspoređivali samo inducirani naponi bez složene obrade signala, ne bi bilo moguće jednostavno utvrditi prekid prstena, stoga je ponovno primijenjena metoda oduzimanja induciranih napona. Na slici 5.60 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem napona u Ms1 i Ms3 na  $2\tau_p$ . Ukoliko se promotri dobiveni oblik napona, u njemu se mogu primjetiti karakteristični porasti napona koji su međusobno udaljeni za  $2\tau_p$ . Tako se na osnovu ovakvog valnog oblika može vrlo pouzdano i bez složene obrade signala, utvrditi i ova vrsta kvara rotorskoga kaveznog namota. Ovaj valni oblik napona razlikuje se od valnog oblika dobivenog kod prekida štapa (slika 5.53) po tome što za jedan okret rotora u razlici napona dobivenoj oduzimanjem induciranih napona postoji ukupno četiri porasta napona. Ti porasti prikazani na slici 5.60 pojavljuju se u parovima i to na način da se prvo pojavi po jedan porast u pozitivnom, a potom drugi u negativnom smjeru i to neposredno jedan pored drugog. Sljedeća dva porasta napona pojavljuju se točno za  $2\tau_p$ , (20 ms) i to ponovno neposredno jedan pored drugoga s time da je sada prvi porast u negativnom, a drugi u pozitivnom smjeru odnosno suprotno od prvog porasta napona. Također, iako ovaj valni oblik podsjeća na prekid dva susjedna štapa kaveza (slika 5.57), detaljnom analizom mogu se razlučiti ova dva kvara. U slučaju prekida dva susjedna štapa točno se može odrediti pojavljivanje prekida drugog štapa (drugi porast napona) jer je on udaljen od prvog za točno 1,42 ms. Ovaj vremenski trenutak je određen na osnovu broja štapova rotora ( $N_{\text{štapova}} = 28$ ) i vremenu trajanja jednog okreta stroja koji iznosi 40 ms. Dijeljenjem perioda okreta s brojem štapova rotora dobiva se iznos od 1,42 ms,

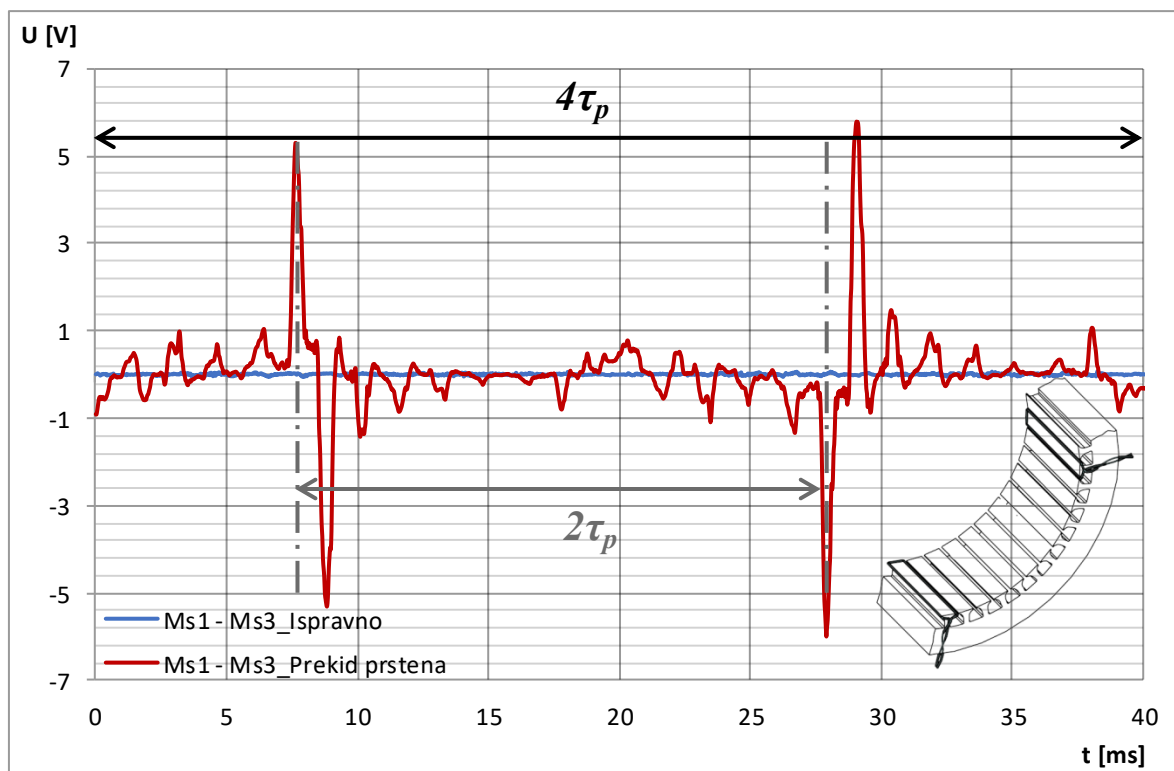
odnosno vremenski razmak između pojavljivanja dvaju štapova. Kod prekida prstena pojavljivanje neposrednog drugog porasta napona je manje od 1,42 ms i iznosi 1,2 ms. Stoga, ovo karakteristično svojstvo koje se očituje u razlici napona dobivenoj oduzimanjem induciranog napona u svicima razmaknutima za  $2\tau_p$  je od iznimne važnosti budući da omogućava pouzdano raspoznavanje prekida prstena od prekida više štapova.



Slika 5.58 Shema spoja kaveznog namota – mjesto prekida prstena



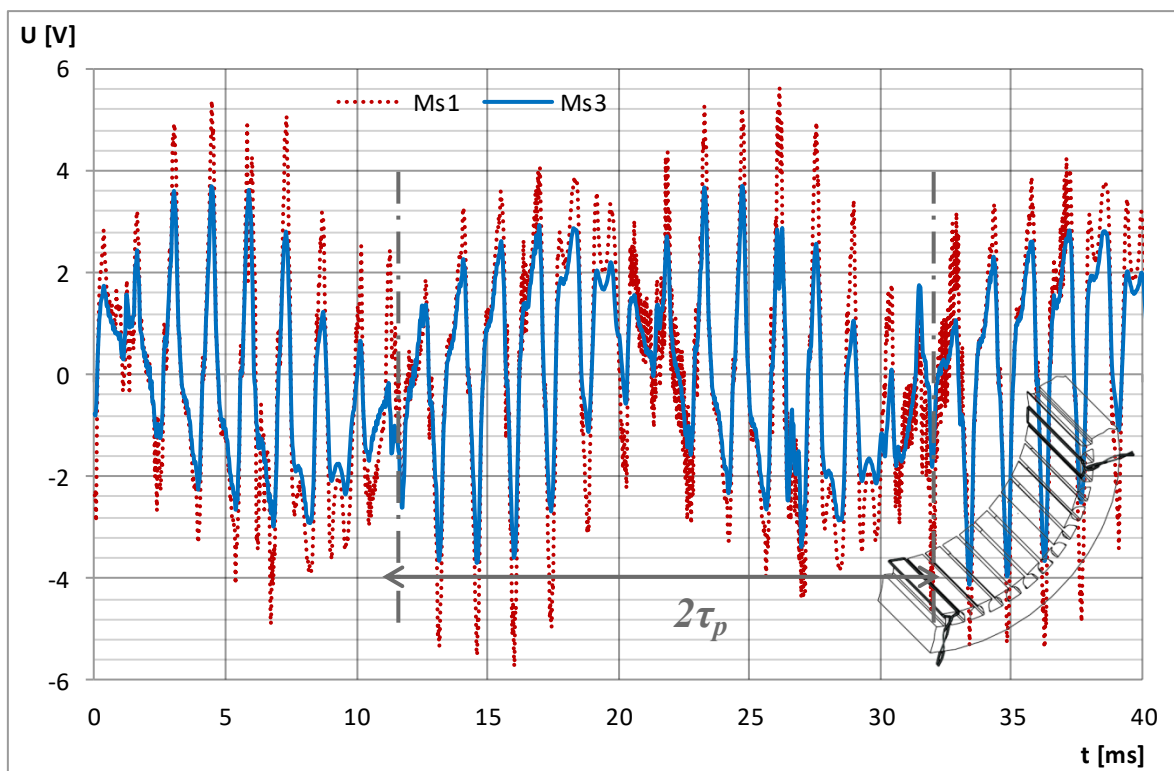
Slika 5.59 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod prekida prstena kaveznog namota



Slika 5.60 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (prekid prstena kaveznog namota)

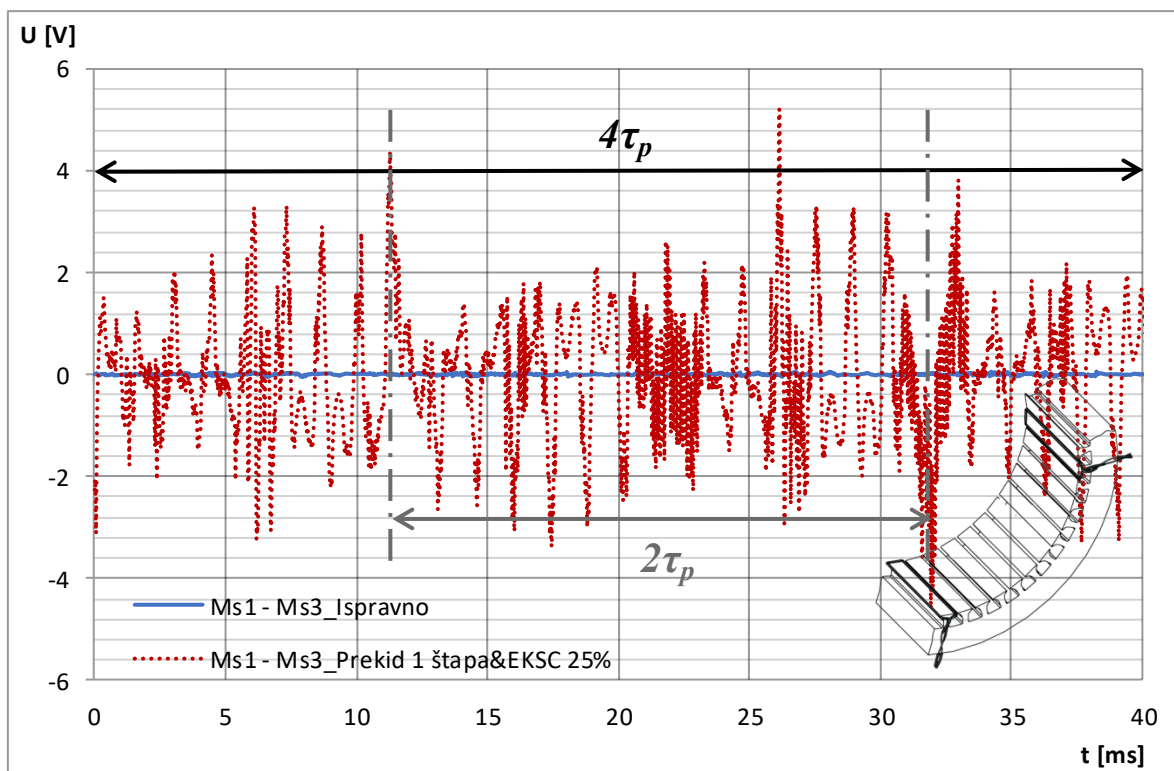
#### 5.3.4. Utjecaj kombinacije kvarova rotora na inducirane napone u mjernim svicima

U svrhu prepoznavanja pojedine vrste kvara rotora motora, napravljen je jedan MKE proračun motora kada su prisutna dva kvara na rotoru. Kombinacija kvarova koja je analizirana je prekid jednog štapa rotora uz prisutan statički ekscentricitet iznosa 25 % zračnog rasporeda. Slika 5.61 prikazuje inducirani napon u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su međusobno razmaknuti za  $2\tau_p$ . Budući da je prisutan statički ekscentricitet rotora i to pomak u smjeru + y osi, na slici se može vidjeti da je napon induciran u Ms1 kontinuirano, za cijeli okret rotora, po apsolutnom iznosu veći od napona induciranog u Ms3. Ukoliko se primijeni metoda oduzimanja napona induciranih u mjernim svicima dobiva se valni oblik napona prikazan na slici 5.62.



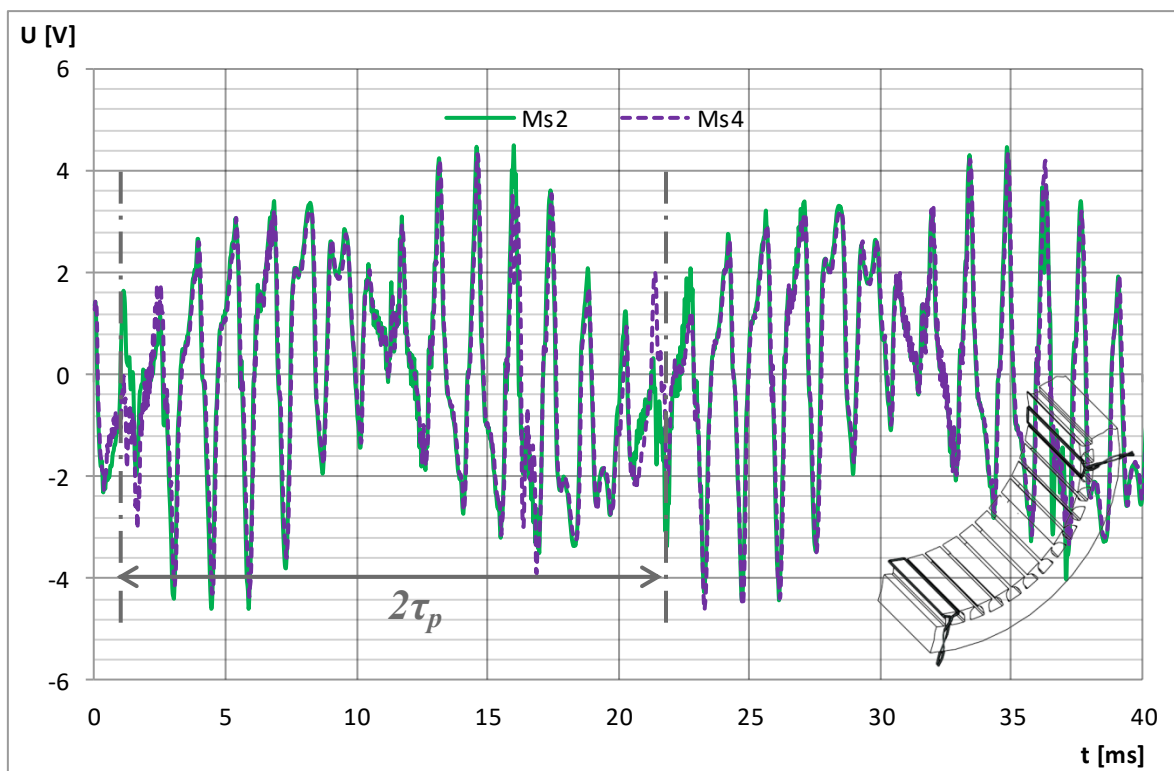
Slika 5.61 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod kombinacije dvaju kvarova rotora rotora – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 %

Analizom valnog oblika napona dobivenog oduzimanjem može se vidjeti da se u valnom obliku mogu prepoznati karakteristični porasti napona (specifična nadvišenja napona) koji su međusobno pomaknuti za  $2\tau_p$ , a posljedica su prekida jednog štapa rotora. Valja napomenuti da kod iznosa ekscentriciteta od 25 % postoji više porasta napona koji mogu zamaskirati poraste napona uzrokovane prekidom štapa, stoga su za potrebe ove kombinacije kvara dodatno analizirani i valni oblici induciranog napona u Ms2 i Ms4, što je i prikazano na slici 5.63.

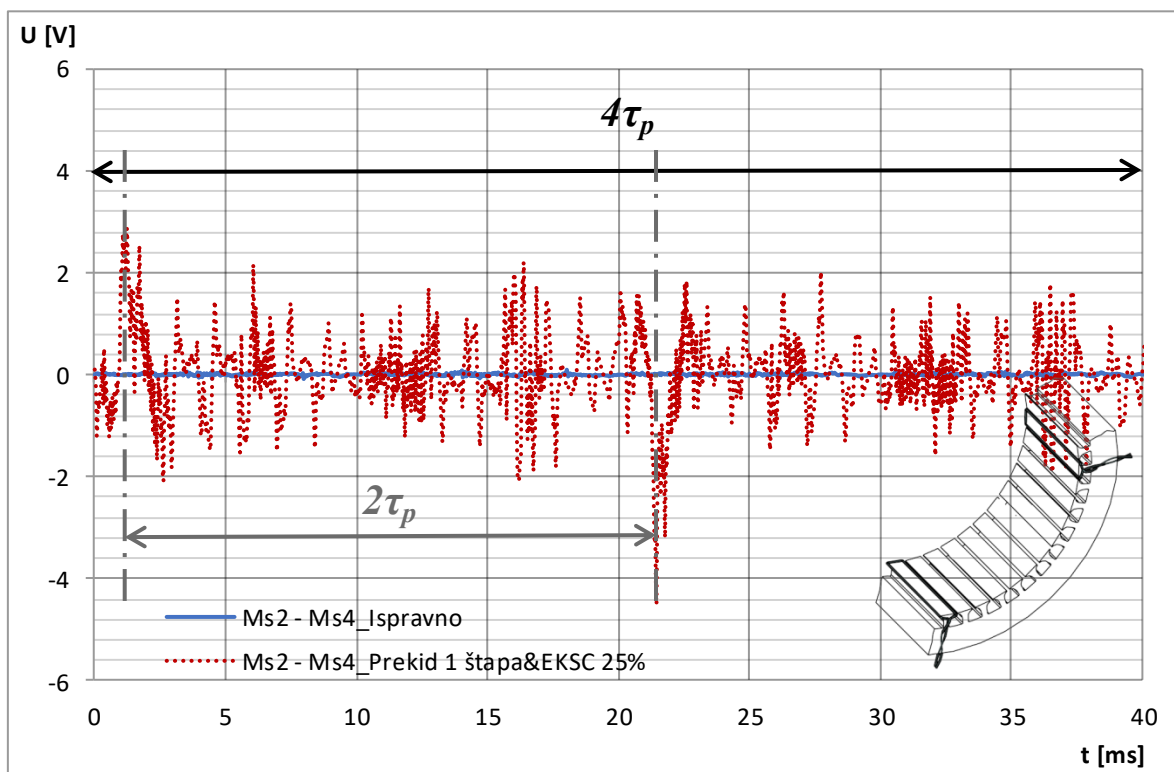


Slika 5.62 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje (kod kombinacije dvaju kvarova rotora – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 %)

Budući da je pomak rotora ostvaren u smjeru  $+y$  osi, naponi inducirani u ova dva svitka su praktički identični. Prema tome, ukoliko se primijeni metoda oduzimanja induciranih napona u Ms2 i Ms4, dobiva se valni oblik napona prikazan na slici 5.64. Analizom valnog oblika na slici može se vidjeti, da za jedan okret rotora, u njemu postoje dva karakteristična porasta napona koja su međusobno razmaknuta za  $2\tau_p$  i koja ukazuju na prekid jednog štapa rotora. Na osnovu prikazanog može se zaključiti da ukoliko se kombiniraju četiri svitka u otkrivanju različitih vrsta kvarova rotora, moguće je na osnovu induciranih napona i metode oduzimanja istih prepoznati pojedinu vrstu kvara rotora koja je u prethodnom dijelu rada analizirana svaka zasebno. Inducirani naponi u mjernim svicima te valni oblik dobiven oduzimanjem istih prikazan je za jedan okret rotora, odnosno za  $4\tau_p$  što odgovara vremenskom intervalu od 40 ms.



Slika 5.63 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  kod kombinacije dvaju kvarova rotora – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 %



Slika 5.64 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  za ispravno i kvarno stanje – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 %

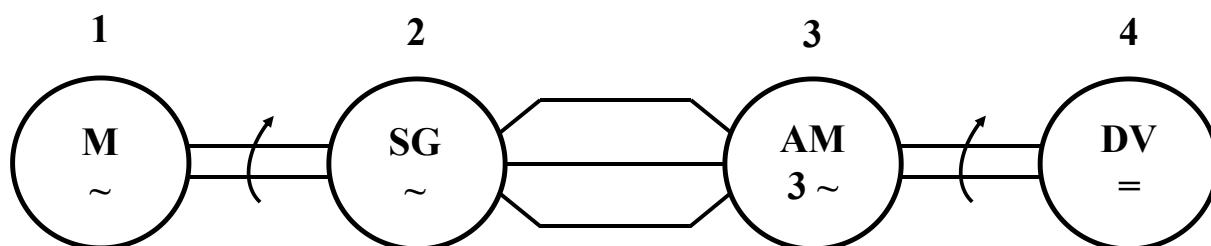
#### **5.4. Optimalni raspored i položaj mjernih svitaka za određivanje kvarova kaveznog rotora**

Na osnovi MKE proračuna i analiziranih kvarova određen je optimalni raspored i potreban broj mjernih svitaka za otkrivanje pojedinih kvarova rotora asinkronog motora. Prema rezultatima provedenih istraživanja, potrebno je u zračni raspored ovog motora ugraditi najmanje četiri svitka koji su međusobno razmaknuti za polni korak  $\tau_p$ . Potrebno je mjerne svitke razmaknuti za polni korak kako bi bilo moguće primijeniti metodologiju međusobnog oduzimanja inducirano napona u mjernim svicima.

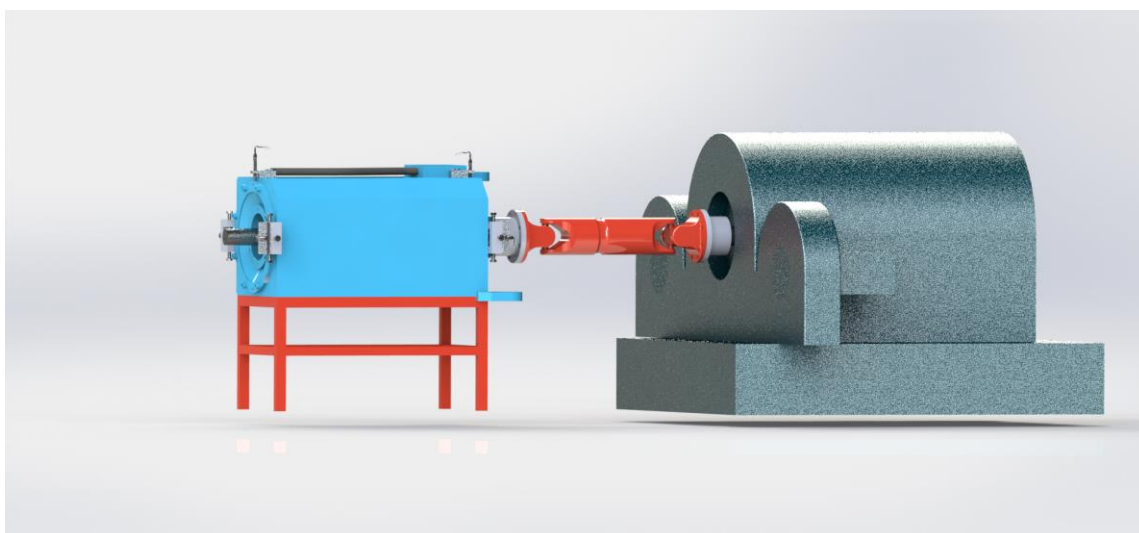
Točan raspored i položaj mjernih svitaka prikazan je na slici 5.5. Rezultati MKE proračuna pokazali su da bi u slučaju prekida jednog ili više štapova te prekida prstena bilo dovoljno ugraditi dva mjerna svitka. Međutim, za utvrđivanje statičkog ekscentriciteta neophodno je potrebno ugraditi četiri svitka. Također, u slučaju pojave kombinacije kvarova potrebno je koristiti metodu oduzimanja napona u različitim kombinacijama, tj. međusobno oduzimati inducirane napone u mjernim svicima na polnom i na dvostrukom polnom koraku. Osim toga, rezultati su pokazali da je u slučaju ekscentriciteta korisno i potrebno pratiti efektivnu vrijednost inducirano napona u svakom pojedinom mjernom svitku te vršiti međusobnu usporedbu istih. *Tako je pokazano, na osnovu dobivenih rezultata proračuna i analiza, da je za pouzdano i točno prepoznavanje pojedine vrste kvara rotora potrebno ugraditi po obodu statora asinkronog motora najmanje četiri mjerna svitka razmaknuta međusobno za  $\tau_p$ .*

## 6. Rezultati mjerenja na motoru

U ovom poglavlju prikazani su rezultati mjerenja provedeni na vučnom asinkronom motoru tipске oznake V6AOJ 205-04. Ispitivani motor je posebno adaptiran kako bi se na njemu mogla provesti mjerenja uz prisutnost rotorskih kvarova koji su analizirani numeričkim MKE proračunom. Mjerenja su provedena s ciljem potvrde jedne ili više teza i rezultata dobivenih proračunom. Na slici 6.1 prikazana je principijelna shema spoja, a na slici 6.2 model ispitnog poligona na kojem se nalazi asinkroni motor (ispitni objekt) i dinamovaga (opteretni stroj). Izvor napajanja je trofazni sinkroni generator koji osigurava stabilan sinusni napon iznosa 276 V i frekvencije 50 Hz potreban za napajanje motora. Kao opteretni stroj koristi se istosmjerni stroj čiji su nazivni podaci dani u tablici 6.1. U zračni raspored motora ugrađeni su mjerni svici čiji je tip i oblik prikazan na slici 6.3. Izvodi ugrađenih svitaka dovode se do mjerne laboratorijske stanice gdje se spajaju na odgovarajuće ulazne naponske module. Mjerenja su provedena u praznom hodu te kod različitih iznosa opterećenja. Za verifikaciju proračuna, mjerenja su provedena u ispravnom stanju te za različita kvarna stanja.



Slika 6.1 Principijelna shema spoja: 1 – izmjenični motor, 2 – sinkroni generator, 3 – ispitivani objekt (asinkroni motor), 4 – opteretni stroj (dinamovaga)



Slika 6.2 Model ispitnog poligona s asinkronim motorom (ispitni objekt) i dinamovagom (opteretni stroj)

Tablica 6.1 Nazivni podaci opterećenog stroja – dinamovage

| DINAMOVAGA |      | TIP: MS 2821 - 4 |     |
|------------|------|------------------|-----|
| P [kW]     |      | 100              |     |
| U [V]      |      | 440              |     |
| I [A]      |      | 210              |     |
| $I_u$ [A]  | 3,5  | $U_u$ [V]        | 220 |
| m [kg]     | 1500 | 1970             |     |

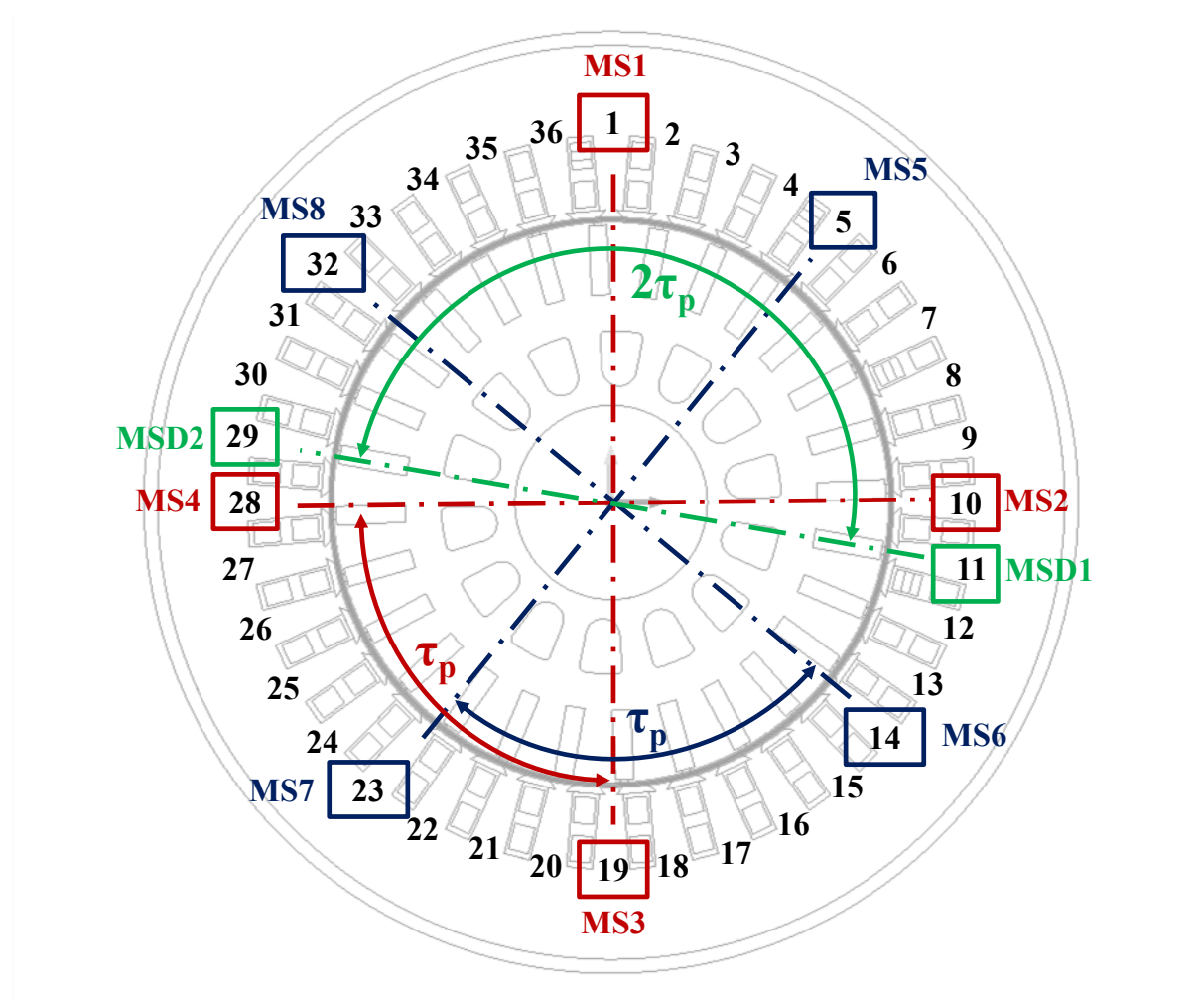


Slika 6.3 Mjerni svitak za detekciju kvara izrađen u PCB tehnologiji

Na slici 6.4 prikazana je ugradnja mjernih svitaka u zračni raspor (na zub statorskog paketa) motora. U raspor je ugrađeno ukupno 10 mjernih svitaka, prvenstveno iz sigurnosnih razloga jer zbog relativno maloga zračnog raspora postojala je mogućnost da prilikom sastavljanja, ali i provedbe mjerenja dođe do oštećenja samih svitaka. Također su u svrhu ispitivanja i određivanja osjetljivosti mjernih svitaka testirane i moguće druge dimenzije svitaka, što se i vidi na slici 6.4 (manji svitak). Taj manji svitak je prilikom mjerenja na motoru pokazao znatno manju osjetljivost (znatno manji inducirani napon) pa stoga ti rezultati nisu u daljnjem istraživanju posebno analizirani. Slika 6.5 prikazuje raspored i međusobni položaj ugrađenih svitaka u zračni raspor stroja. Svici na slici 6.5 označeni crvenom bojom međusobno su udaljeni za polni korak ( $\tau_p$ ) i čine jednu grupu svitaka. Druga grupa svitaka (na slici 6.5 označeni plavom bojom) također je, međusobno, udaljena za polni korak ( $\tau_p$ ), dok su svici označeni zeleno (treća grupa) dodatni svici koji su međusobno, jedan od drugog, udaljeni za dvostruki polni korak ( $2\tau_p$ ).



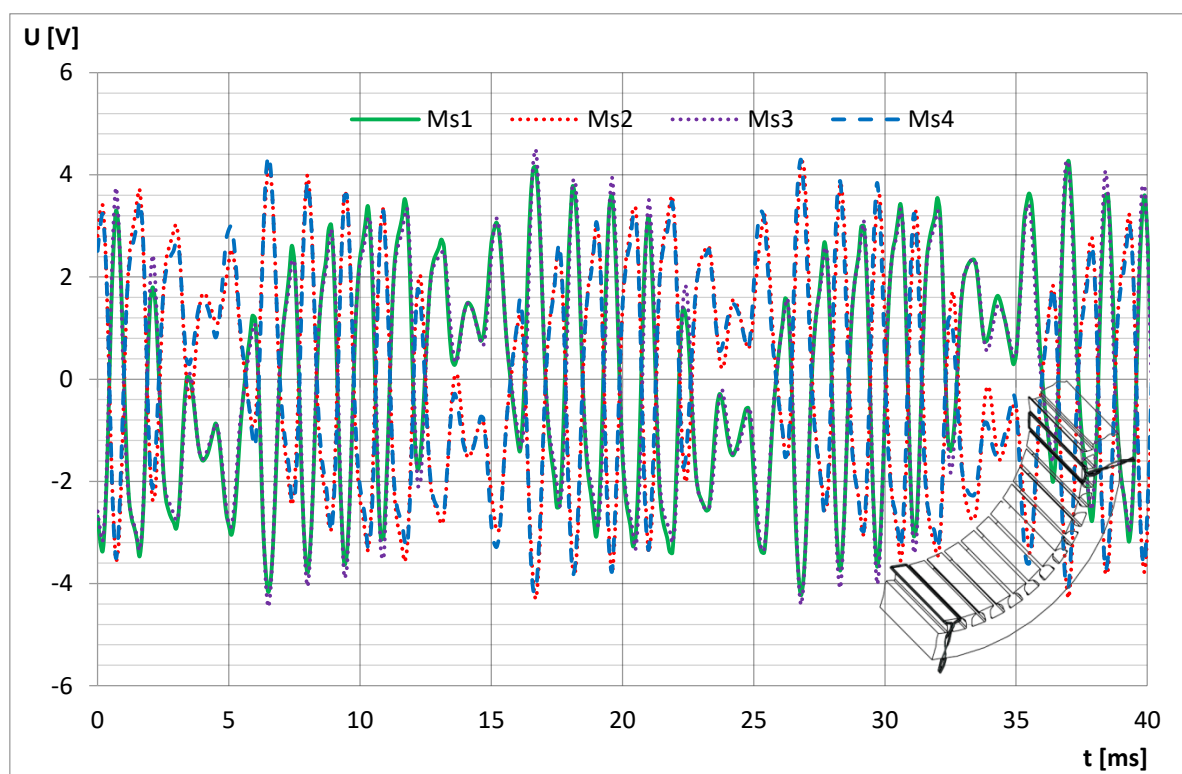
Slika 6.4 Mjerni svici ugrađeni u zračni raspored motora



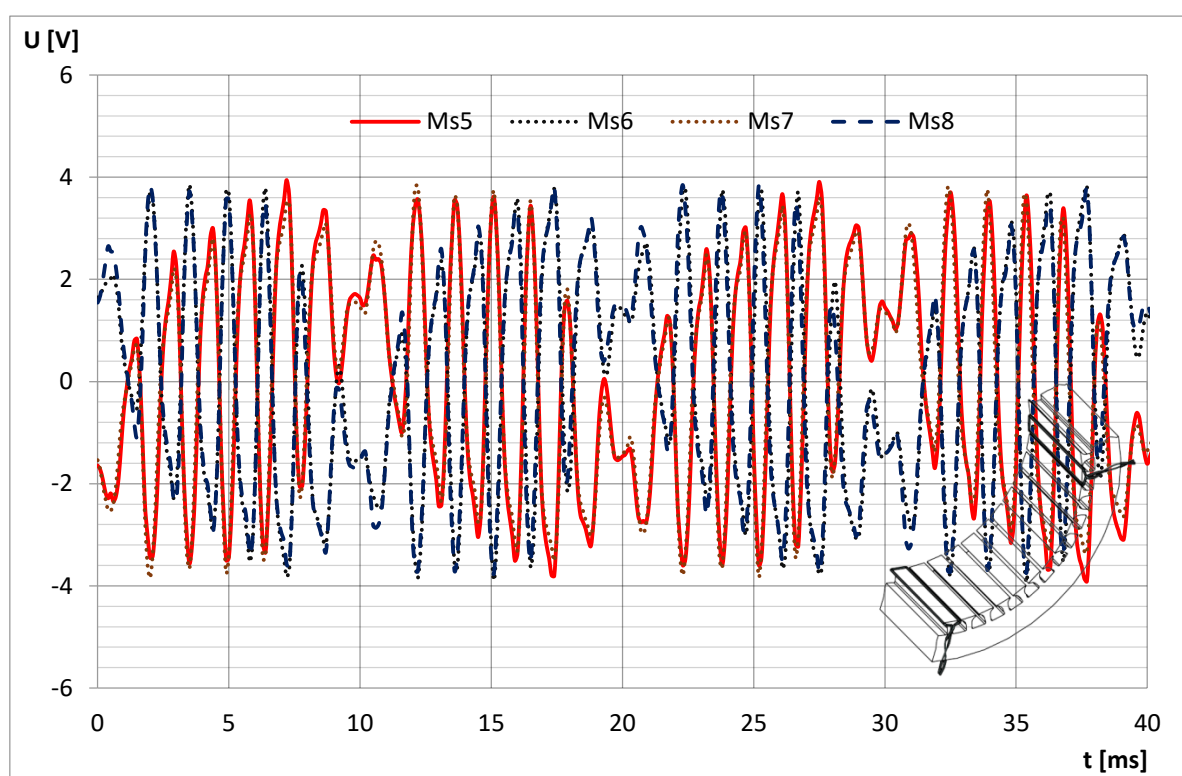
Slika 6.5 Raspored i pozicije ugrađenih mjernih svitaka po obodu motora

### **6.1. Rezultati mjerenja za ispravno stanje**

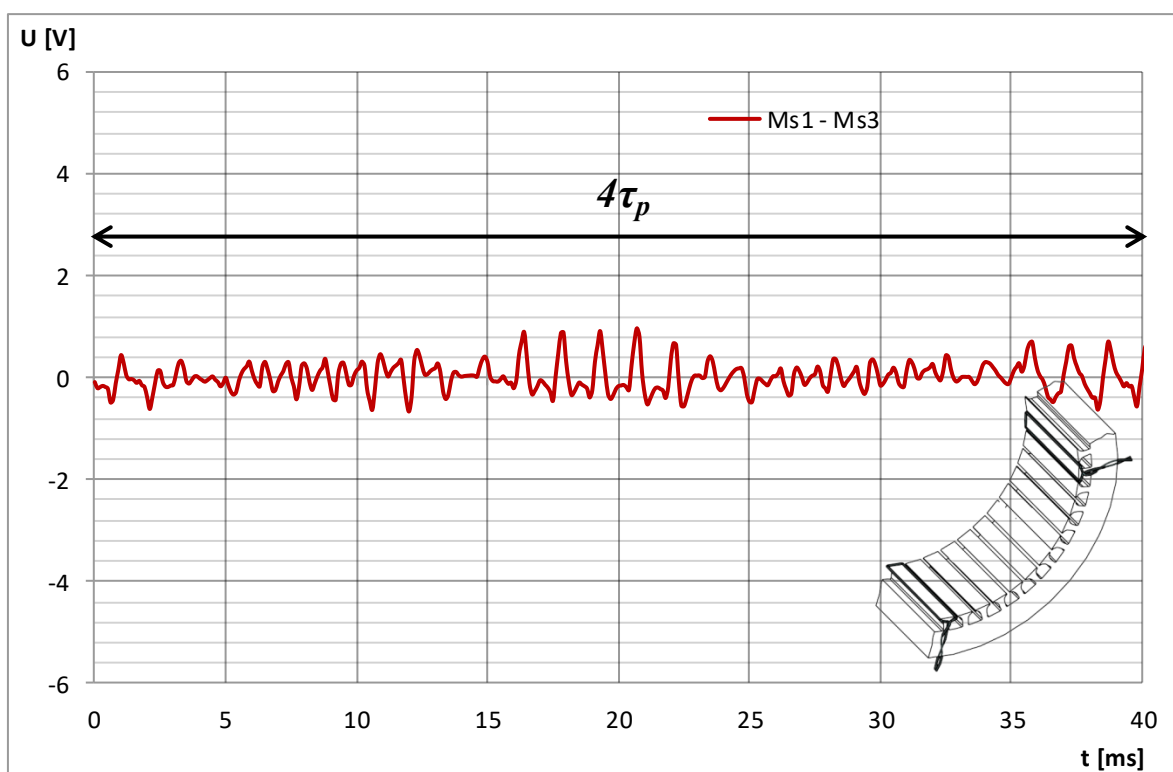
Nakon ugradnje mjernih svitaka, sastavljanja motora i montiranja na ispitni poligon, najprije su provedena mjerenja u ispravnom stanju i to za prazni hod te za različite iznose opterećenja. Kontinuirano su tijekom provedbe mjerenja promatrani valni oblici induciranih napona u mjernim svicima, njihov oblik i efektivna vrijednost. Prikazani su inducirani naponi kod pogonskog stanja motora kada kroz vodiče statorskog namota protječe struja u iznosu od 136 A što je stanje maksimalno dozvoljenog opterećenja (ograničenje zbog zagrijavanja jer je zbog dorade štitova motoru bilo potrebno ukloniti ventilator s osovine). Na slici 6.6 prikazani su inducirani naponi u mjernim svicima Ms1 do Ms4, a na slici 6.7 Ms5 do Ms8 dobiveni mjerenjem i to za jedan puni okret rotora, što odgovara vremenskom intervalu od 40 ms. Valni oblici induciranog napona u mjernim svicima, koji su ugrađeni u zračni raspor motora, posljedica su ozubljenja rotora i okretnog polja rotora, što je opisano u prethodnom poglavlju. U valnom obliku induciranog napona ponovno se može odrediti broj porasta i propada napona koji iznosi 28 odnosno odgovara broju štapova kaveza. Primjenom metode oduzimanja napona induciranog u mjernim svicima, dobiveni su valni oblici prikazani na slikama 6.8 i 6.9. Analizom i pregledom valnih oblika na navedenim slikama, vidi se da u ispravnom stanju razlika napona dobivena serijskim spajanjem svitaka Ms1 i Ms3 na dvostrukom polnom koraku te Ms1 i Ms2 na polnom koraku, nije jednaka ničici kao što je to u slučaju dobivenom MKE proračunom. To je rezultat nesavršenosti i grešaka prilikom ugradnje te pozicioniranja mjernih svitaka, tolerancije u izradi i sastavljanju motora, a to sve utječe na rezultate mjerenja i očituje se u induciranom naponu mjernog svitka. Ove tvrdnje potkrepljene su i mjernom nesigurnošću koja je određena i prikazana u tablici 3.6, gdje su točno navedeni doprinosi koji utječu na točnost mjerenja. Tako je za navedene faktore moguće, na osnovi podataka iz tablice 3.6, odrediti mjernu nesigurnost koja se odnosi samo na parametre koji utječu na točnost mjerenja induciranih napona u mjernim svicima. Za ovaj analizirani motor određeno je da ta mjerna nesigurnost iznosi  $\pm 8,32$  %.



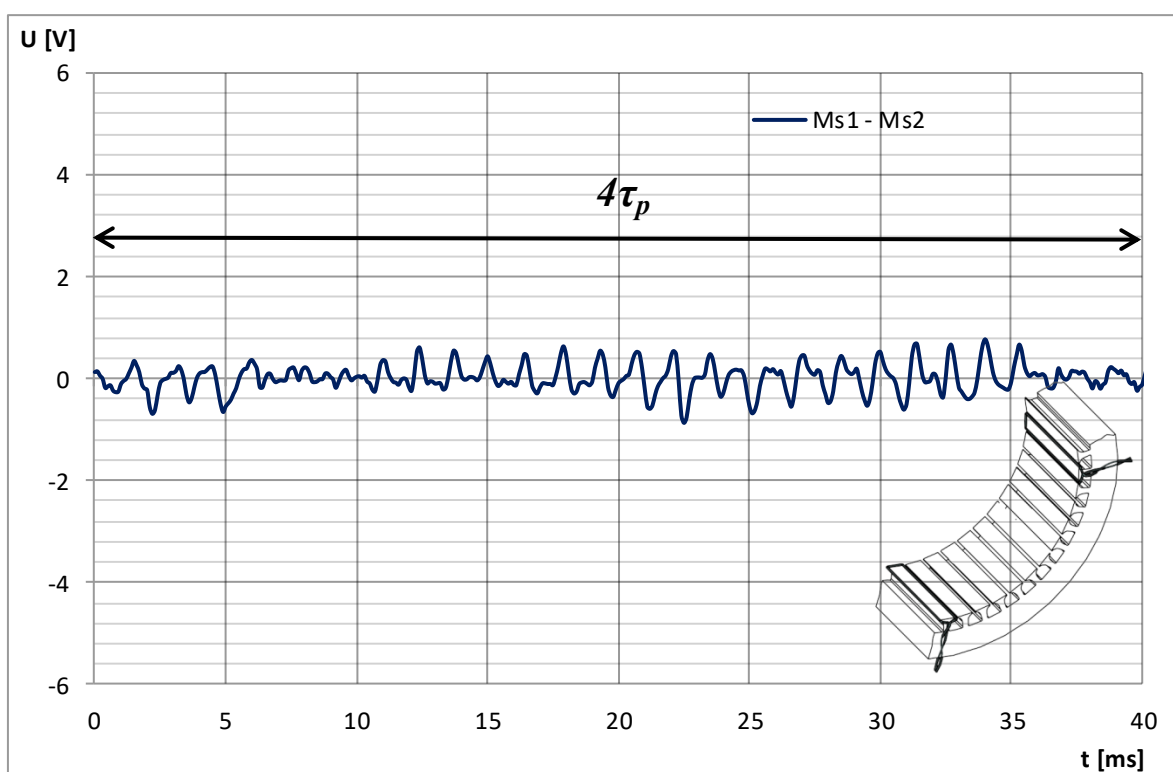
Slika 6.6 Izmjereni valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 u ispravnom stanju kod struje motora  $I_n = 136$  A



Slika 6.7 Izmjereni valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 u ispravnom stanju kod struje motora  $I_n = 136$  A



Slika 6.8 Razlika izmjerenih napona u svicima Ms1 i Ms3 – oduzimanje na dvostrukom polnom koraku,  $2\tau_p$  kod struje motora  $I_n = 136$  A



Slika 6.9 Razlika izmjerenih napona u svicima Ms1 i Ms2 – oduzimanje na polnom koraku,  $\tau_p$  kod struje motora  $I_n = 136$  A

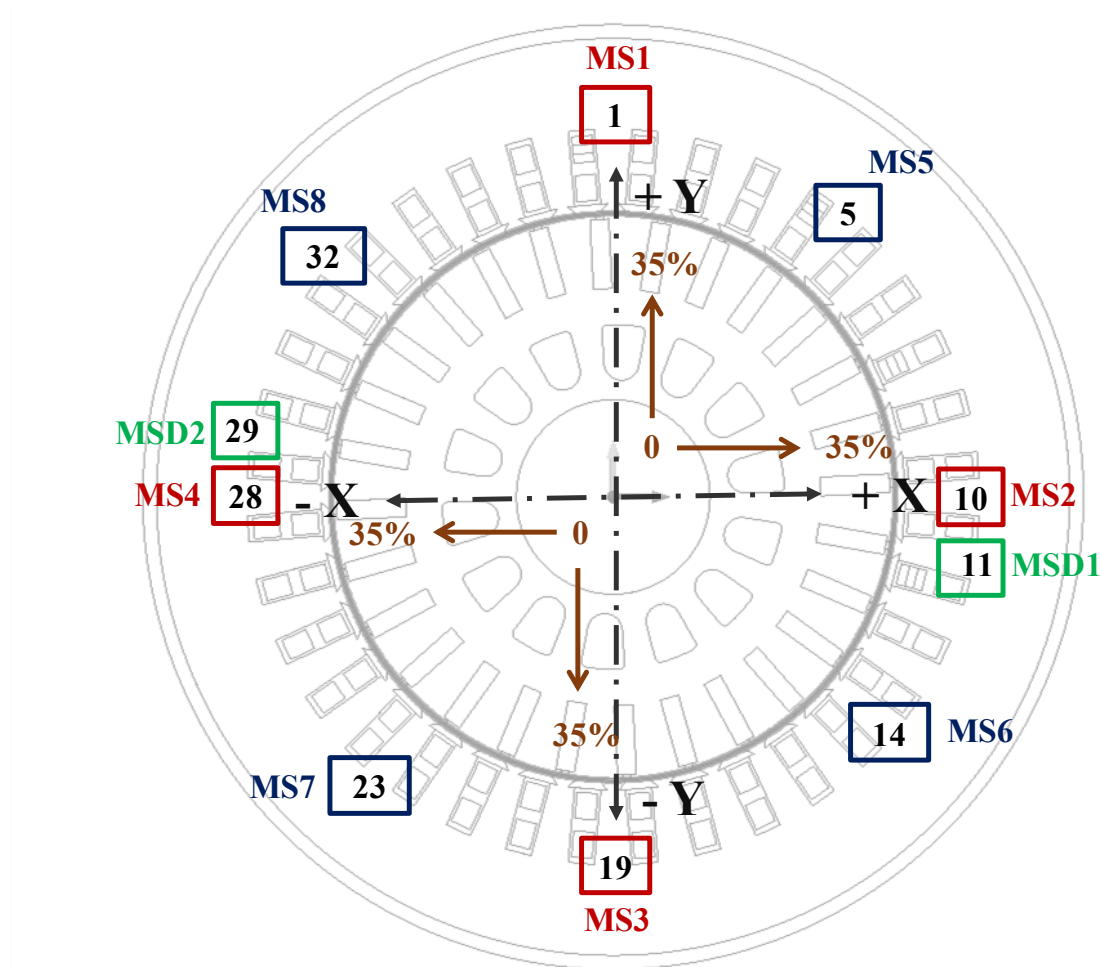
U tablici 6.2 navedene su efektivne vrijednosti induciranog napona u mjernim svicima koje su dobivene kod struje opterećenja motora 136 A u ispravnom stanju. Iz prikazanih podataka vidi se da je u ispravnom stanju postignuto dobro slaganje izmjerenih induciranih napona, budući da je međusobno odstupanje vrijednosti induciranih napona unutar 5 %, što iznosi manje od dobivene mjerne nesigurnosti ( $\pm 8,32$  %) koja u obzir uzima samo faktore koji utječu ili mogu utjecati na iznos induciranog napona u mjernim svicima.

Tablica 6.2 Efektivne vrijednosti izmjerenih napona u svicima kod struje motora  $I_n = 136$  A – rotor u centru

| U<br>[V] | I<br>[A] | MS1<br>[V] | MS2<br>[V] | MS3<br>[V] | MS4<br>[V] | MS5<br>[V] | MS6<br>[V] | MS7<br>[V] | MS8<br>[V] | MSD1<br>[V] | MSD2<br>[V] |
|----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 276      | 136      | 2,151      | 2,172      | 2,159      | 2,134      | 2,198      | 2,194      | 2,122      | 2,182      | 2,218       | 2,136       |

### 6.2. Utjecaj statičkog ekscentriciteta rotora na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima

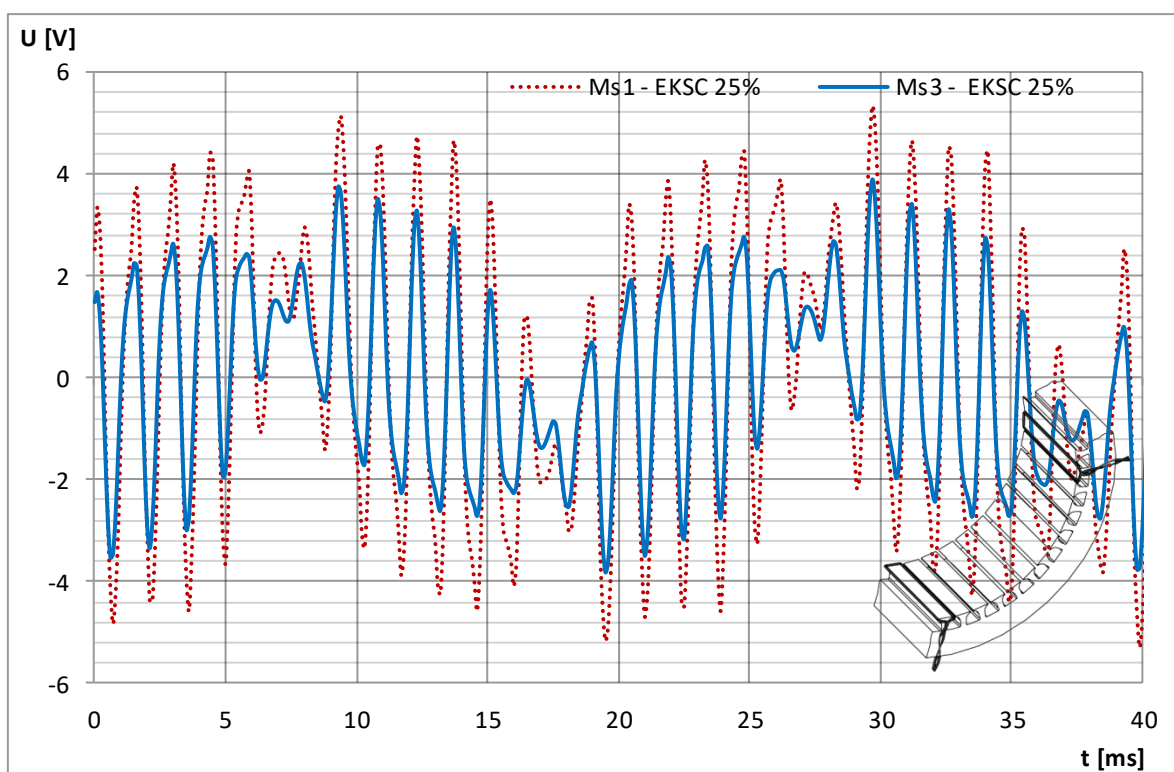
Posljedica pojave ekscentriciteta rezultira dodatnim gubicima u statoru i rotoru, smanjenjem korisnosti, pojavom osovinskog napona i vibracija te je stoga pouzdano, točno i rano otkrivanje ove vrste kvara rotora od iznimne važnosti za elektromotorni pogon [94]. Na asinkronom motoru na kojem su provedena mjerenja moguće je izazvati samo pojavu statičkog ekscentriciteta te su svici ugrađeni u zračni raspored korišteni samo za otkrivanje ove vrste ekscentriciteta. U svicima je praćena i analizirana promjena iznosa te promjena valnog oblika induciranog napona kod različitih iznosa statičkog ekscentriciteta. Pomicanje rotora ostvareno je pomoću posebno doradenih ležajnih štitova (opisano u poglavlju 3), što omogućuje izazivanje ekscentriciteta u bilo kojem smjeru. Na slici 6.10 prikazani su smjerovi pomicanja rotora, uz naznačeni postotak iznosa ekscentriciteta koji je ostvaren prilikom mjerenja. Za kontrolu iznosa, koliko i u kojem smjeru je pomaknut rotor, korišteni su induktivni senzori koji su smješteni na PS i SS stranu motora (pozicije ugradnje senzora opisane su u poglavlju 3). Promjena napona induktivnog senzora za 1 V na univerzalnom instrumentu odgovara pomaku ležajnog štita za 0,1 mm. Budući da zračni raspored motora iznosi 1 mm, promjena od samo 1 V na induktivnim sensorima znači izazivanje statičkog ekscentriciteta u iznosu od 10 % zračnog rasporeda.



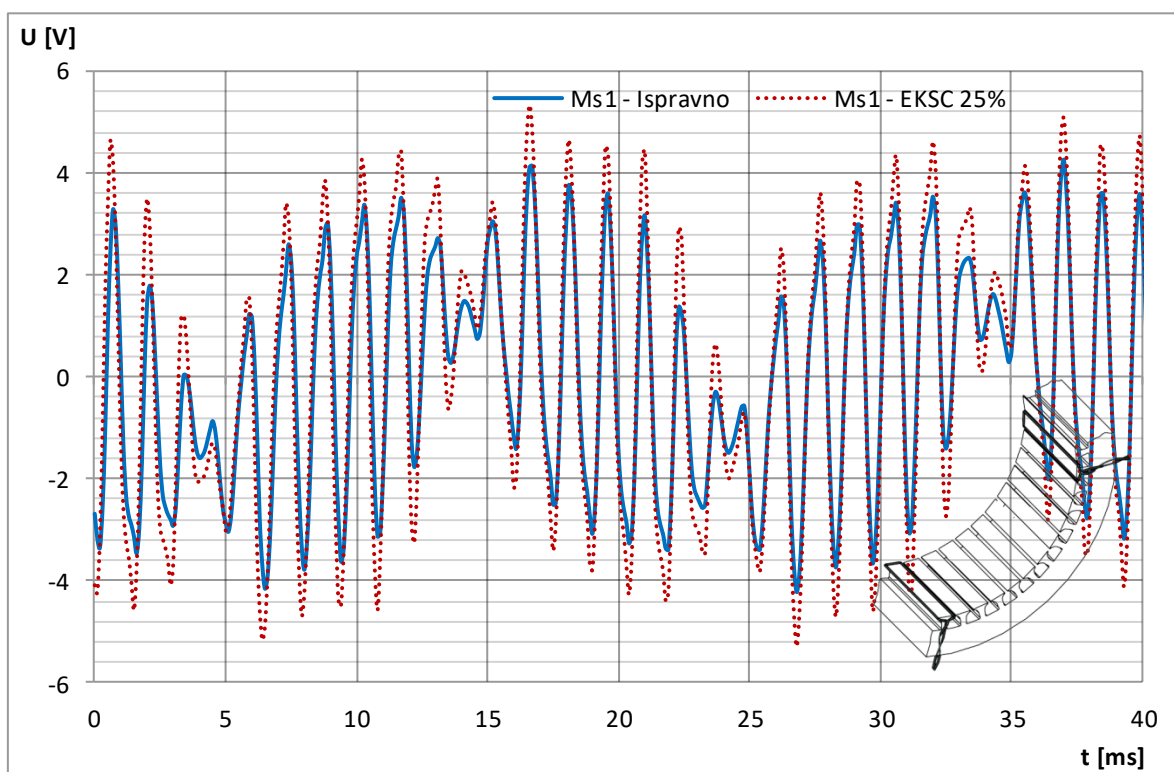
Slika 6.10 Smjerovi pomicanja rotora s ciljem izazivanja statičkog ekscentriciteta

Maksimalni iznos statičkog ekscentriciteta koji je postignut prilikom mjerenja je bio kod vertikalnog pomicanja rotora u pozitivnom smjeru 25 % zračnog raspora, a kod pomicanja u negativnom smjeru 30 % zračnog raspora. U nastavku je dan prikaz induciranih napona u mjernim svicima dobiven mjerenjem za slučaj maksimalnoga statičkog ekscentriciteta koji je postignut pomicanjem rotora za pozitivan i negativan smjer. Na slici 6.11 prikazana je usporedba inducirano napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,25 mm) i pomaka rotora u smjeru + y osi. Analizom inducirano napona mjernih svitaka na slici 6.11 jasno se može vidjeti da kod ovog iznosa statičkog ekscentriciteta, napon induciran u svitku Ms1 je po apsolutnom iznosu veći od napona induciranog u Ms3. To je logičan rezultat jer je rotor, a time i okretno magnetsko polje bliže svitku Ms1 pa je i očekivano da je i inducirani napon po apsolutnom iznosu veći nego u svitku Ms3. Na slici 6.12 prikazana je usporedba valnog oblika napona induciranog u svitku Ms1 za ispravno stanje i kod ekscentriciteta iznosa 25 % zračnog raspora. Ako se promotre valni oblici može se vidjeti da, u odnosu na ispravno stanje, dolazi do povećanja

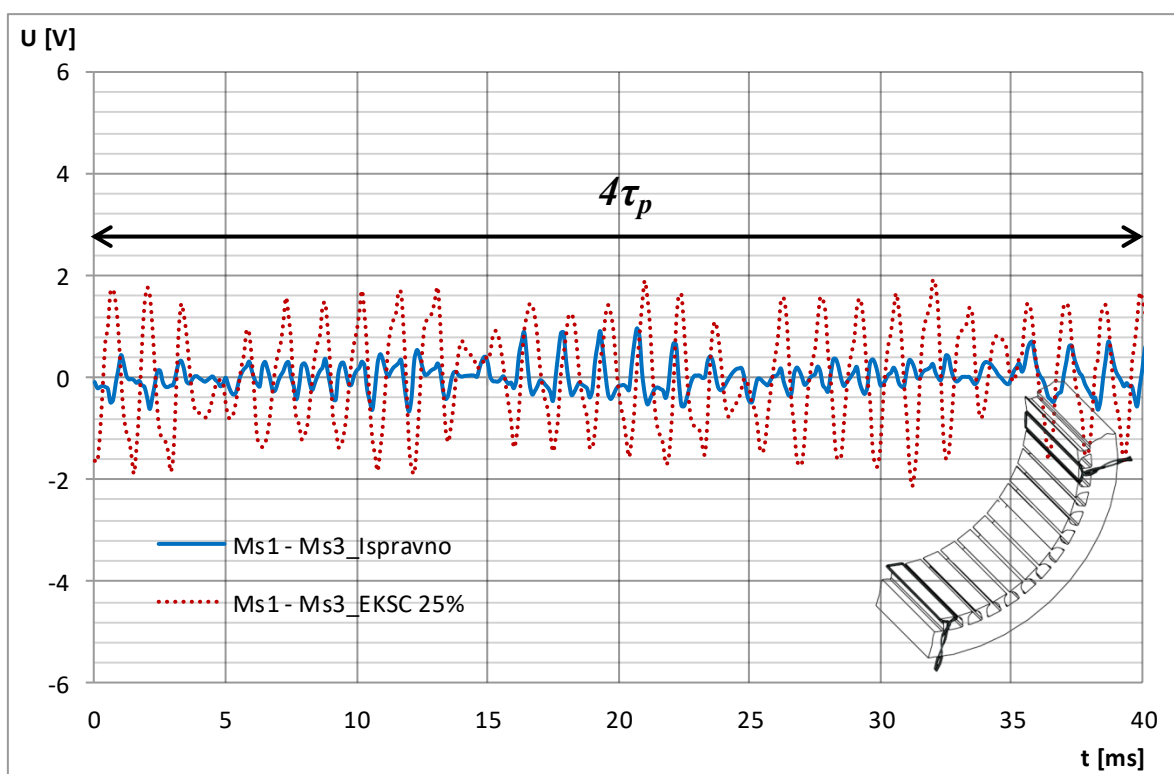
napona prilikom pojave statičkog ekscentriciteta i to u mjernom svitku koji je najbliži rotoru. U ovom konkretnom slučaju određena je efektivna vrijednost induciranog napona svitka Ms1 koja u ispravnom stanju iznosi 2,15 V, a kod statičkog ekscentriciteta 2,70 V, što je međusobno odstupanje od 25,58 %. Na slici 6.13 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prema metodologiji opisanoj u 4. poglavlju i to na način prikladan za mjerne svitke razmaknute za  $2\tau_p$ . Ukoliko se taj valni oblik usporedi s valnim oblikom dobivenim u ispravnom stanju za svitke Ms1 i Ms3, vidi se da je napon dobiven oduzimanjem veći od napona koji je dobiven za ispravno stanje. Također, taj napon, kod statičkog ekscentriciteta, ima pravilan oblik u odnosu na valni oblik dobiven u ispravnom stanju i jednak je iznosu za koji je napon induciran u svitku Ms1 veći od napona Ms3. Time se ponovno potvrđuje da je razlika napona koja je dobivena u ispravnom stanju posljedica nesavršenosti ugradnje svitaka i tolerancija u izradi stroja. Razlika napona koja je dobivena u slučaju statičkog ekscentriciteta zbog svog oblika i iznosa može se upotrijebiti u obradi i analizi podataka čiji je cilj točno i pouzdano otkrivanje ekscentriciteta rotora motora. Na slici 6.14 prikazana je usporedba induciranog napona u Ms2 i Ms4. Iz usporedbe induciranog napona u ova dva svitka može se vidjeti da nema značajnije promjene u valnom obliku i amplitudi induciranih napona te su zapravo naponi identični po iznosu i obliku. To je i očekivano jer je zračni raspor u odnosu na poziciju ova dva svitka jednak za oba svitka. Na slici 6.15 prikazan je inducirani napon u preostalim mjernim svicima koji su ugrađeni u zračni raspor stroja prema slici 6.10. Usporedbom valnih oblika može se jasno utvrditi pomak rotora u + y smjeru, budući da je inducirani napon u svicima Ms5 i Ms8 po apsolutnom iznosu veći od napona u svicima Ms6 i Ms7. To je i očekivano jer su upravo ti svici najbliži rotoru i okretno magnetsko polje u njima inducira veći napon nego u svicima koji su geometrijski smješteni nasuprot svicima Ms5 i Ms8. Valni oblici na svim navedenim slikama prikazani su za jedan puni okret rotora motora odnosno  $4\tau_p$ , što odgovara vremenskom intervalu od 40 ms.



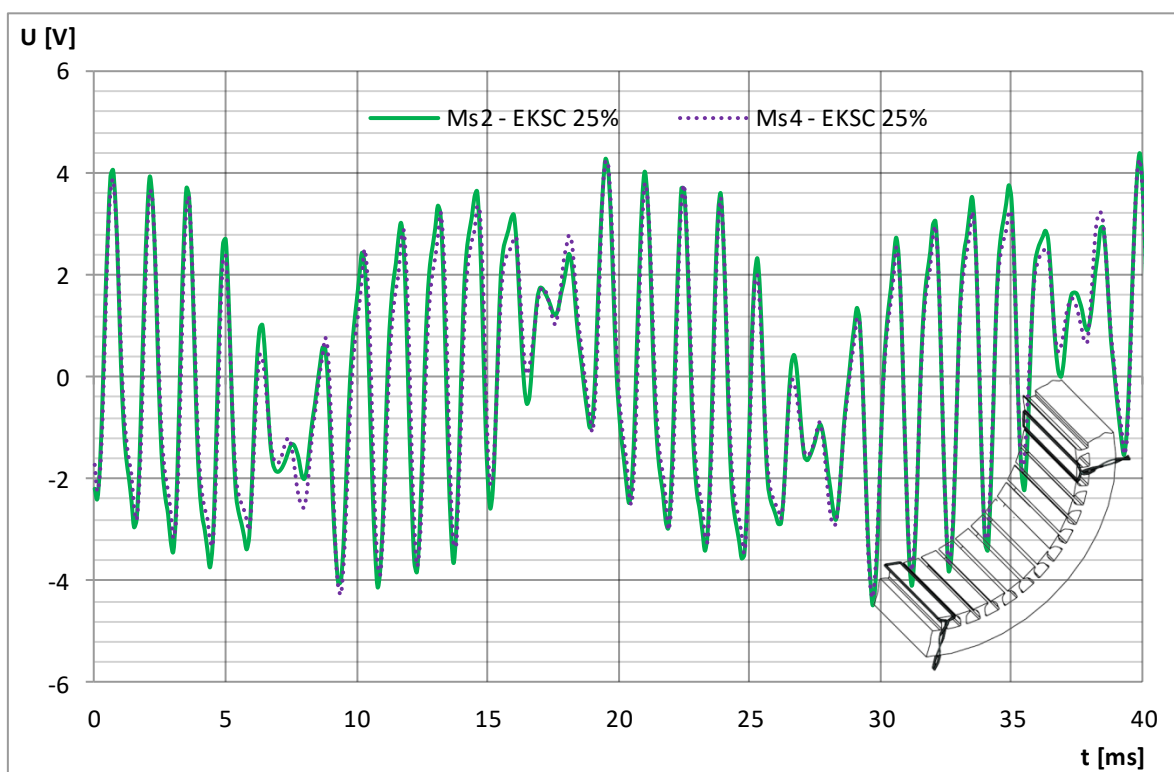
Slika 6.11 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + y osi



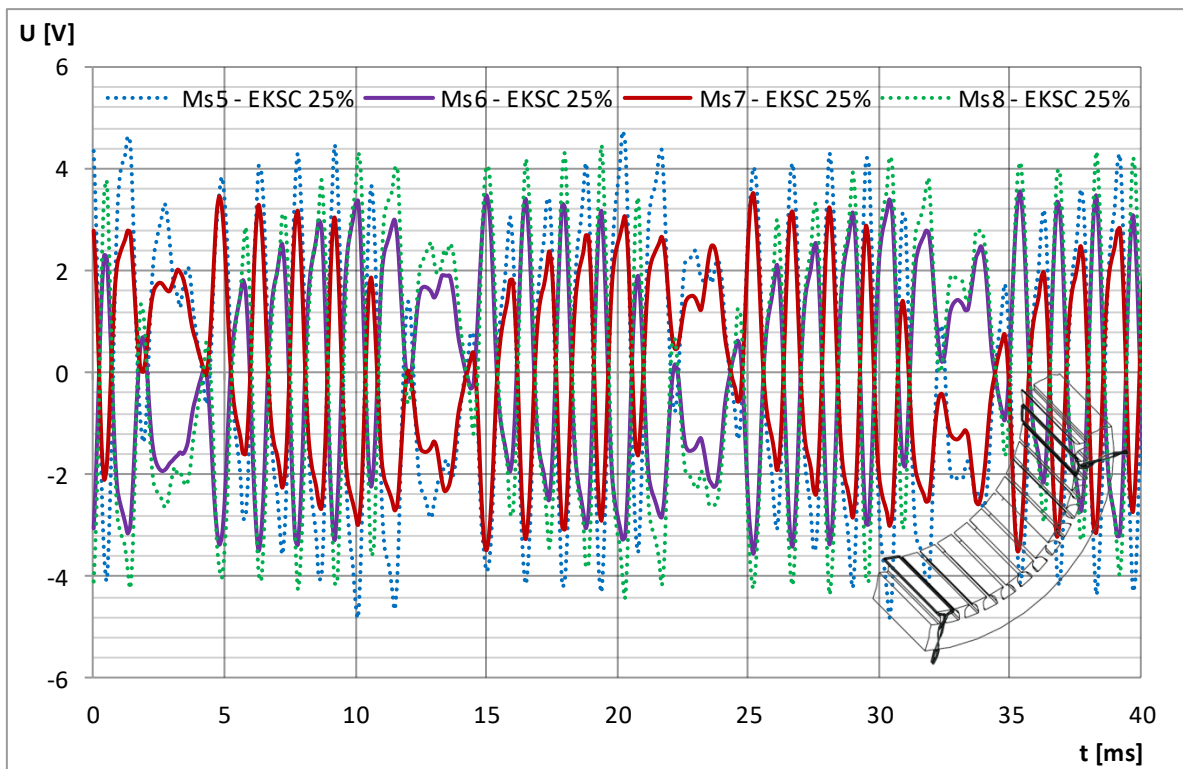
Slika 6.12 Usporedba izmjerenog inducirano napona u mjernom svitku Ms1 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 25 % te pomaka rotora u smjeru + y osi



Slika 6.13 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 na  $2\tau_p$  za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 25 % (pomak u smjeru + y osi)

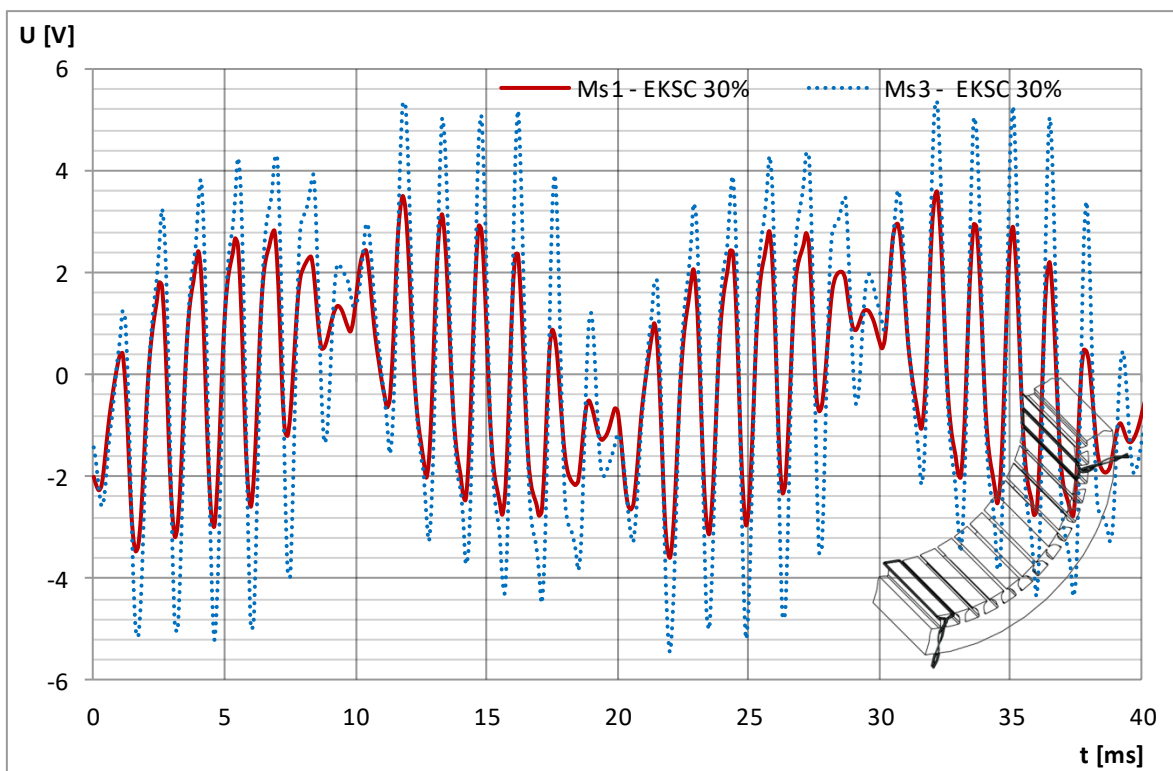


Slika 6.14 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + y osi

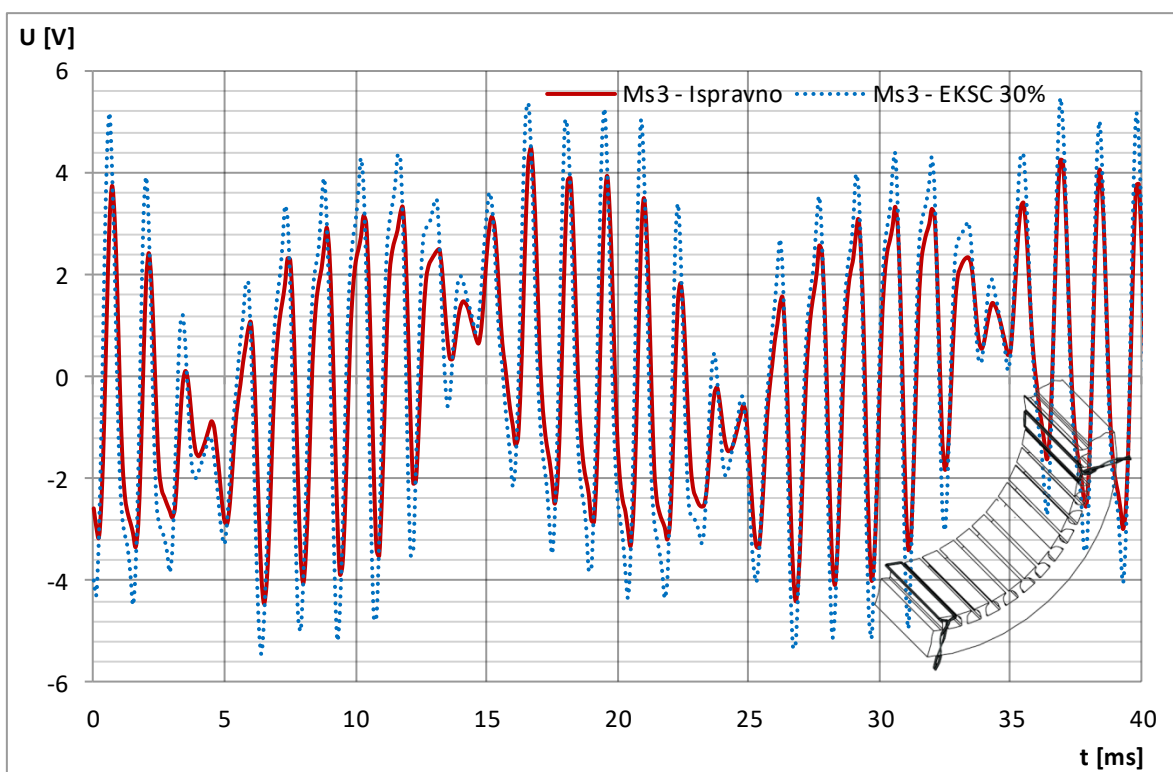


Slika 6.15 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + y osi

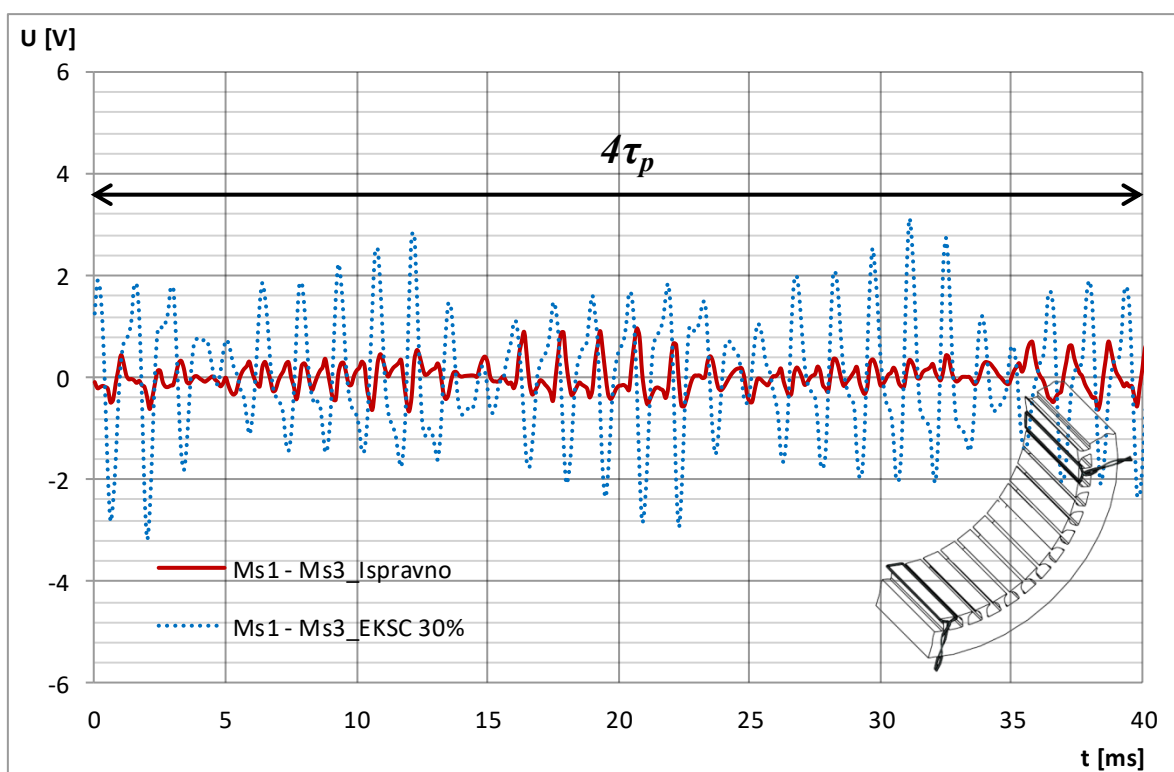
Na slici 6.16 prikazana je usporedba induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 30 % zračnog raspora (što odgovara pomaku od 0,30 mm) i pomaka rotora u smjeru – y osi. Budući da je u odnosu na prethodno analizirani slučaj pomak rotora u suprotnu stranu, napon induciran u svitku Ms3 sada je po apsolutnom iznosu veći od napona induciranog u Ms1. Na slici 6.17 prikazana je usporedba valnog oblika napona induciranog u svitku Ms3 za ispravno stanje i kod ekscentriciteta iznosa 30 % zračnog raspora, a na slici 6.18 prikazan je valni oblik dobiven nakon primjene metode oduzimanja napona induciranog u mjernim svicima. Slika 6.19 prikazuje usporedbu induciranog napona u Ms2 i Ms4 iz koje se vidi da nema promjene u valnom obliku napona budući da je na tim pozicijama zračni raspor jednak za oba svitka. Na slici 6.20 prikazan je inducirani napon u preostalim mjernim svicima koji su ugrađeni u zračni raspor stroja prema slici 6.10.



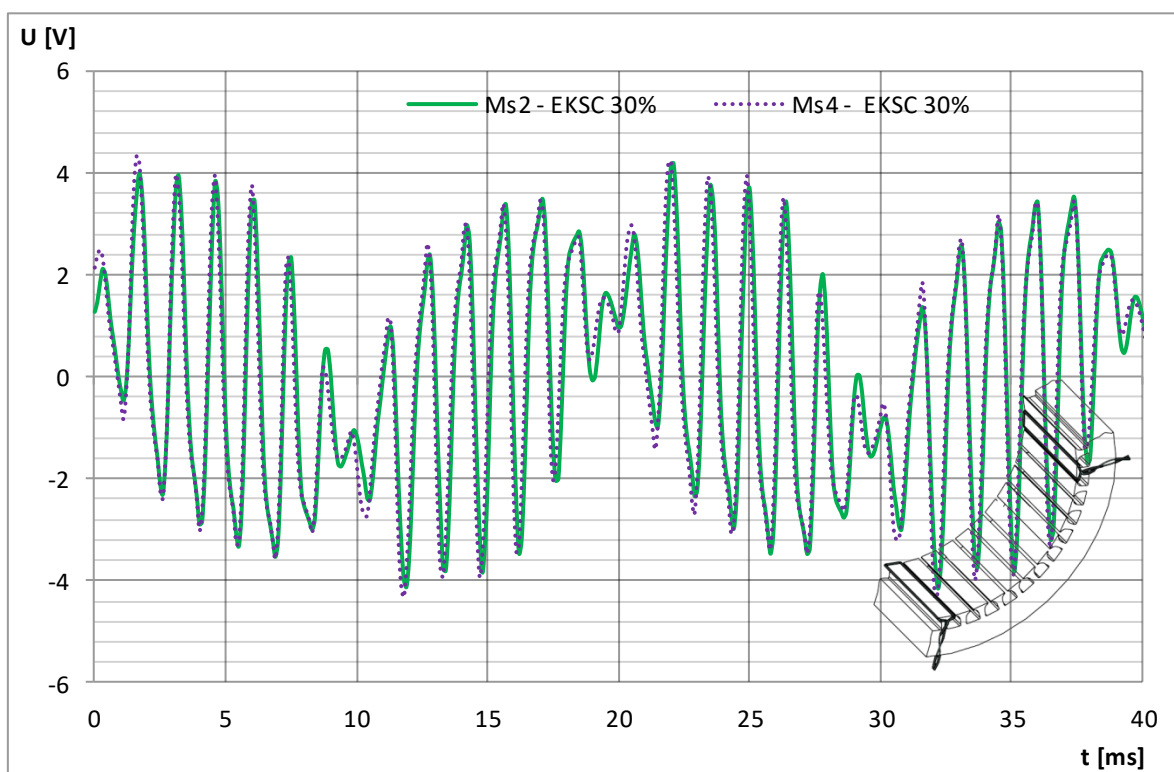
Slika 6.16 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 30 % i pomaka rotora u smjeru – y osi



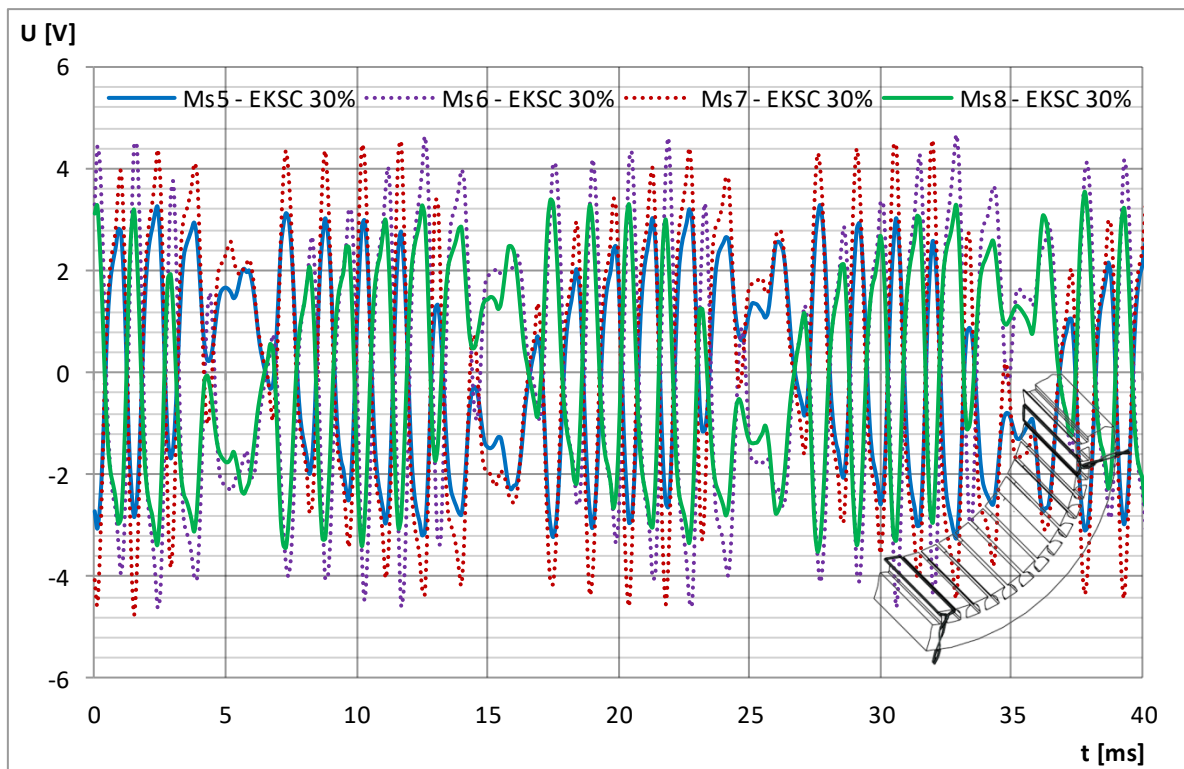
Slika 6.17 Usporedba izmjerenog inducirano napona u mjernom svitku Ms3 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 30 % te pomaka rotora u smjeru – y osi



Slika 6.18 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 na  $2\tau_p$  za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 30 % (pomak u smjeru  $-y$  osi)



Slika 6.19 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 30 % i pomaka rotora u smjeru  $-y$  osi



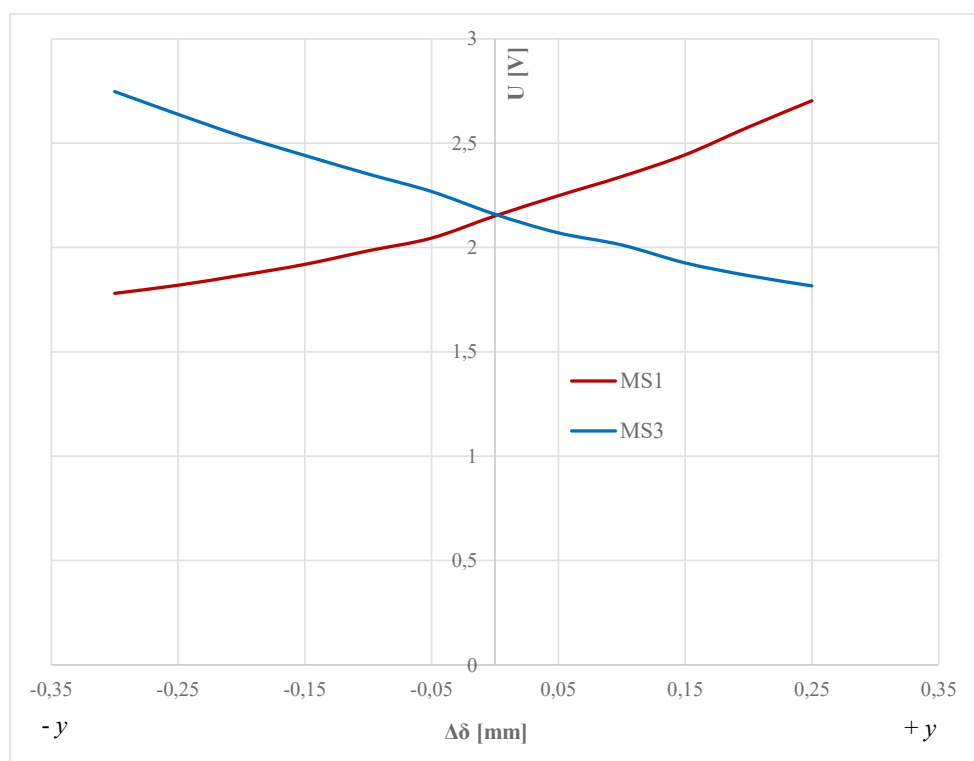
Slika 6.20 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 30 % i pomaka rotora u smjeru  $-y$  osi

Osim pomicanja rotora za 25 % zračnog raspora u smjeru  $+y$  osi i za 30 % u smjeru  $-y$  osi izvršena su pomicanja i za manje iznose ekscentriciteta. U tablici 6.3 navedeni su ostali iznosi ekscentriciteta sa smjerom pomaka rotora. U istoj tablici navedene su efektivne vrijednosti napona induciranih u svakom pojedinom svitku. Ti naponi su iskorišteni kako bi se mogle izraditi krivulje ovisnosti induciranih napona u pojedinim mjernim svicima o iznosu ekscentriciteta (pomak rotora za određeni postotak veličine zračnog raspora). Ukoliko se analiziraju iznosi napona u tablici 6.3, može se vidjeti da kod statičkog ekscentriciteta u iznosu 30 % zračnog raspora međusobno odstupanje induciranih napona između svitaka Ms1 i Ms3 iznosi 54 %. Također, na osnovi dobivenih podataka mjerenja može se vidjeti da mjerni svici smješteni u zračni raspor motora već i kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 10 % imaju odstupanje u iznosu od 18 % (promatrani svici Ms1 i Ms3 i pomak u  $+y$  smjeru). Takva informacija omogućava da mjerni svici i mjerenje induciranih napona u zračnom rasporu motora omogućavaju otkrivanje statičkog ekscentriciteta u ranoj fazi nastajanja i to već kod manjih iznosa.

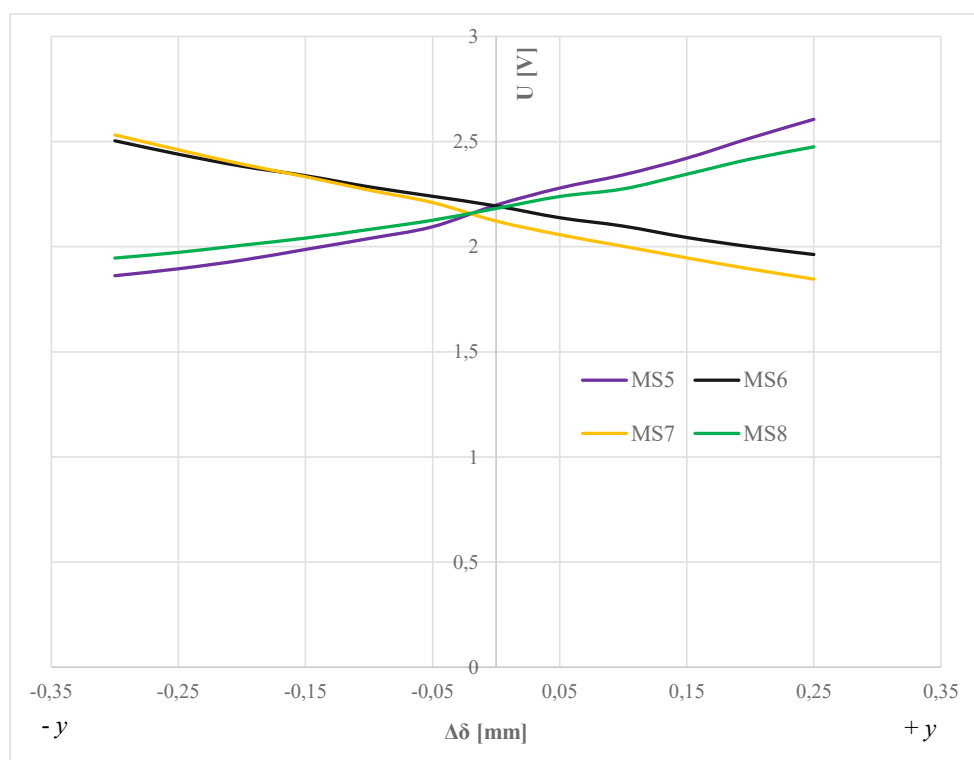
Tablica 6.3 Efektivne vrijednosti izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru

| $\Delta\delta$<br>[mm] | Smjer<br>pomicanja | MS1<br>[V] | MS2<br>[V] | MS3<br>[V] | MS4<br>[V] | MS5<br>[V] | MS6<br>[V] | MS7<br>[V] | MS8<br>[V] | MSD1<br>[V] | MSD2<br>[V] | $\Delta U_{MS1/MS3}$ [%] |
|------------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------------------|
| -0,30                  | prema – y          | 1,780      | 2,141      | 2,747      | 2,172      | 1,862      | 2,504      | 2,532      | 1,946      | 2,109       | 2,250       | 54,32                    |
| -0,25                  | prema – y          | 1,819      | 2,133      | 2,638      | 2,166      | 1,895      | 2,44       | 2,461      | 1,973      | 2,116       | 2,234       | 45,02                    |
| -0,20                  | prema – y          | 1,867      | 2,133      | 2,533      | 2,161      | 1,936      | 2,383      | 2,393      | 2,007      | 2,132       | 2,220       | 35,67                    |
| -0,15                  | prema – y          | 1,919      | 2,142      | 2,441      | 2,153      | 1,987      | 2,338      | 2,333      | 2,041      | 2,152       | 2,201       | 27,20                    |
| -0,10                  | prema – y          | 1,984      | 2,148      | 2,352      | 2,152      | 2,039      | 2,285      | 2,269      | 2,082      | 2,175       | 2,190       | 18,54                    |
| -0,05                  | prema – y          | 2,045      | 2,148      | 2,268      | 2,151      | 2,095      | 2,240      | 2,210      | 2,126      | 2,181       | 2,170       | 10,90                    |
| 0,00                   | centar             | 2,151      | 2,172      | 2,159      | 2,134      | 2,198      | 2,194      | 2,122      | 2,182      | 2,218       | 2,136       | 0,37                     |
| 0,05                   | prema + y          | 2,248      | 2,177      | 2,070      | 2,126      | 2,279      | 2,138      | 2,057      | 2,239      | 2,242       | 2,122       | 8,59                     |
| 0,10                   | prema + y          | 2,34       | 2,198      | 2,012      | 2,122      | 2,342      | 2,098      | 2,002      | 2,275      | 2,274       | 2,100       | 16,30                    |
| 0,15                   | prema + y          | 2,444      | 2,182      | 1,926      | 2,116      | 2,421      | 2,044      | 1,947      | 2,345      | 2,278       | 2,084       | 26,89                    |
| 0,20                   | prema + y          | 2,577      | 2,194      | 1,865      | 2,116      | 2,517      | 2,000      | 1,894      | 2,417      | 2,292       | 2,062       | 38,17                    |
| 0,25                   | prema + y          | 2,703      | 2,211      | 1,816      | 2,115      | 2,606      | 1,963      | 1,846      | 2,475      | 2,318       | 2,046       | 48,84                    |

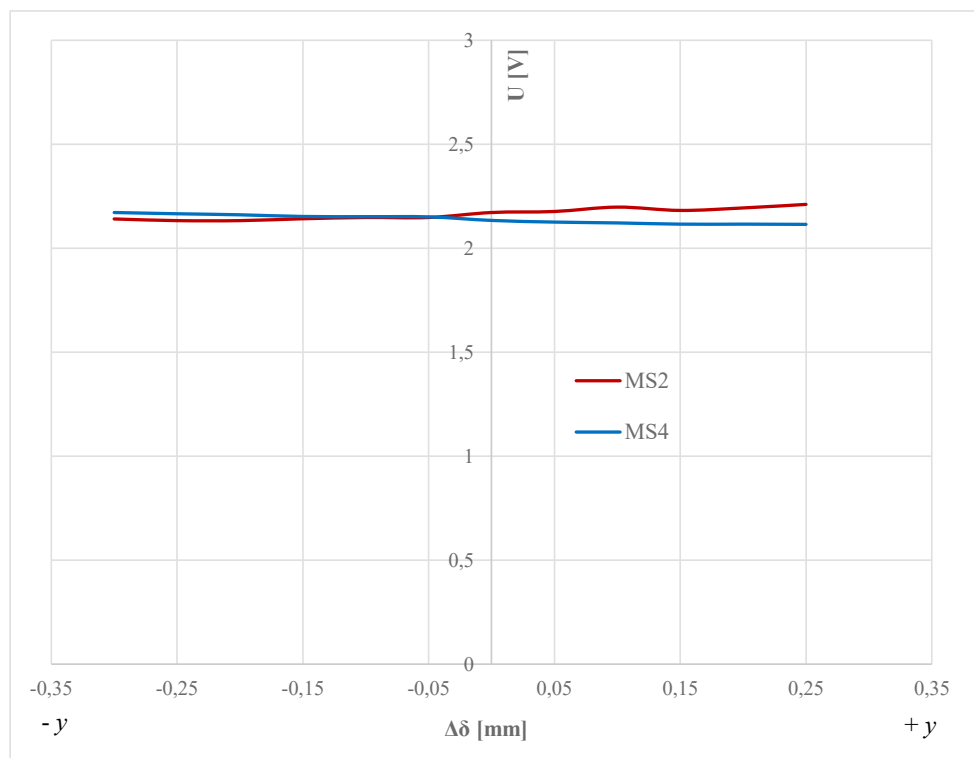
Na slici 6.21 prikazana je krivulja ovisnosti promjene efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru. Promjena efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru prikazana je na slici 6.22., a promjena efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 je prikazana na slici 6.23. Iz prikazanih slika može se vidjeti da mjerni svici Ms2 i Ms4 ne reagiraju na promjenu položaja rotora u vertikalnom smjeru, što je i logično budući da su oni prema slici 6.10 smješteni u horizontalnoj osi (zračni raspored jednak za oba svitka). Preostali svici reagiraju na promjenu položaja s time da je kod svitaka Ms1 i Ms3 dobivena najveća osjetljivost promjene induciranih napona što je i očekivano, budući da su oni točno postavljeni u vertikalnoj osi.



Slika 6.21 Promjena efektivne vrijednosti izmjereneog induciraneog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru

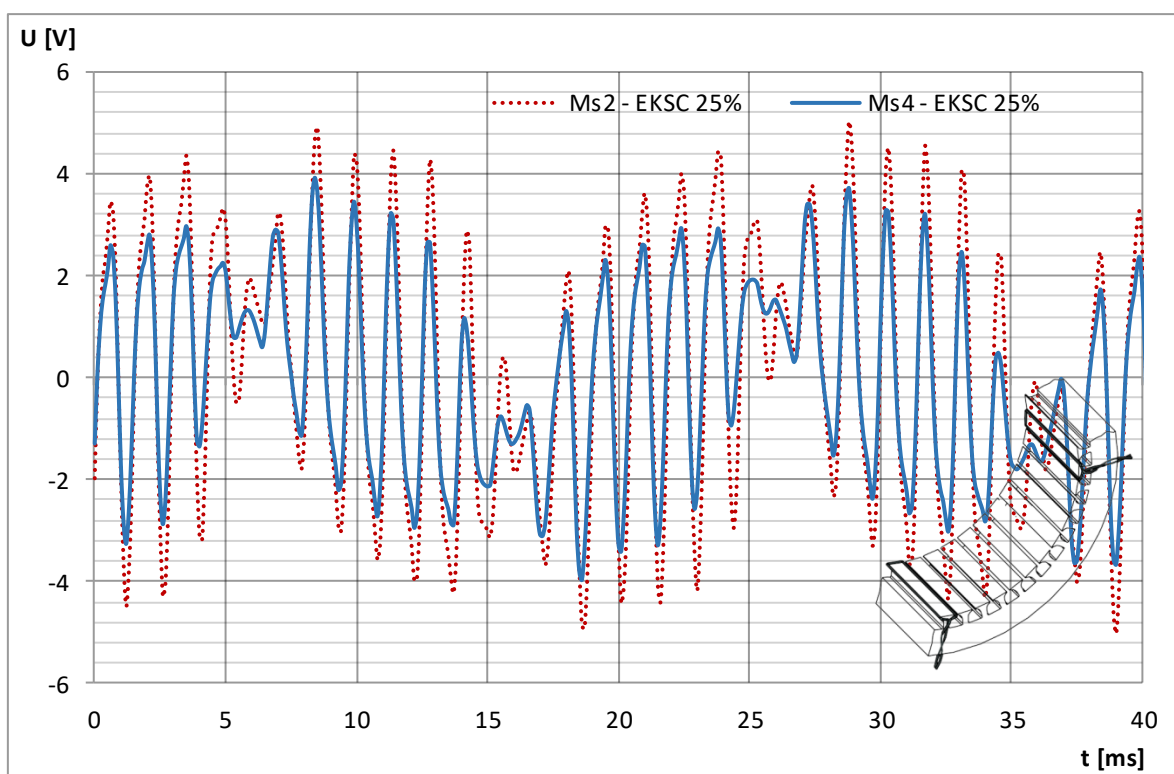


Slika 6.22 Promjena efektivne vrijednosti izmjereneog induciraneog napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru

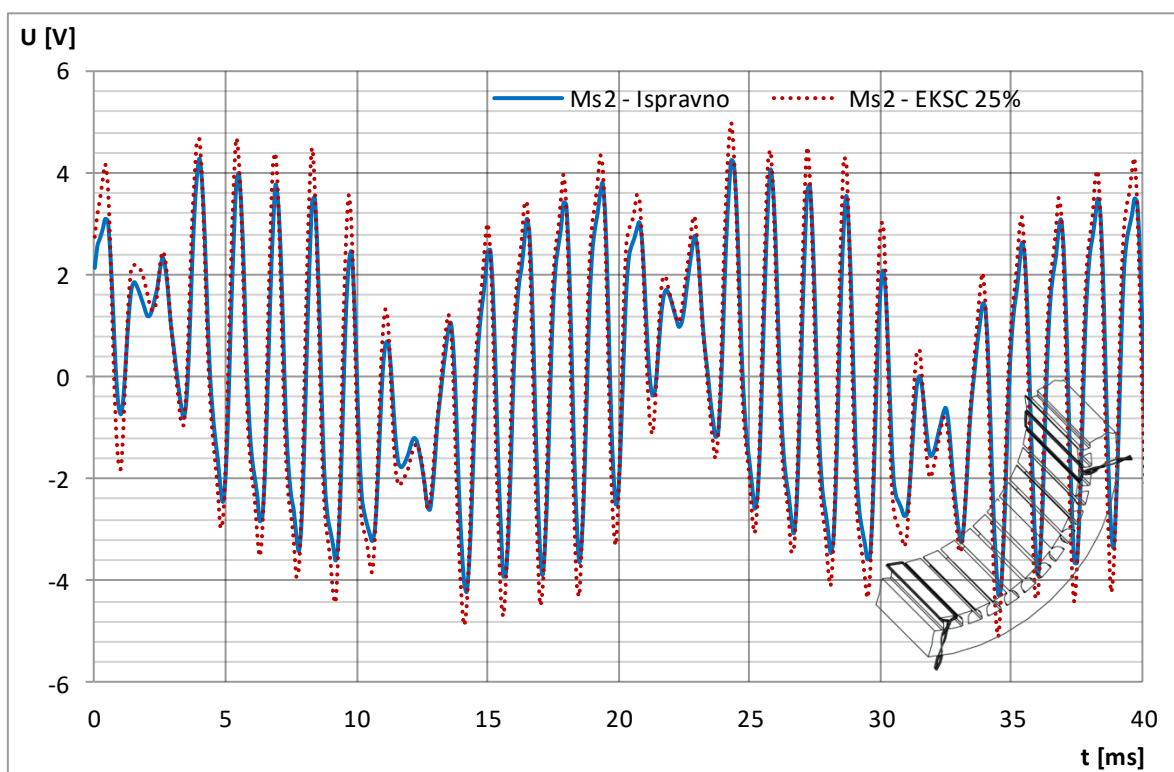


Slika 6.23 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenog induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru

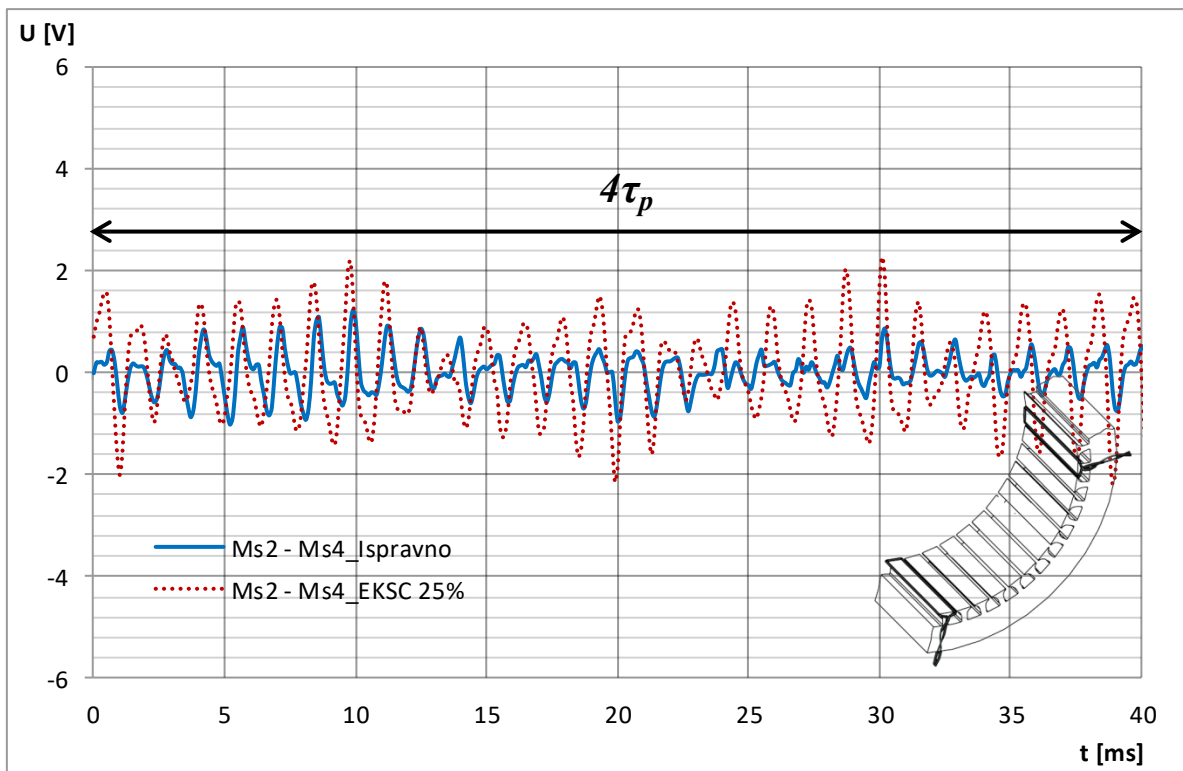
Maksimalni iznos statičkog ekscentriciteta koji je postignut kod pomicanja rotora u horizontalnom smjeru i to za pozitivan smjer je bio 25 % zračnog raspora, a kod pomicanja u negativnom smjeru bio je 35 % zračnog raspora. U nastavku je dan prikaz induciranih napona u mjernim svicima dobiven mjerenjem za slučaj maksimalnog statičkog ekscentriciteta koji je postignut pomicanjem rotora u  $+x$  i  $-x$  smjeru. Na slici 6.24 prikazana je usporedba induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak od 0,25 mm) i pomaka rotora u smjeru  $+x$  osi. Slika 6.25 prikazuje usporedbu valnog oblika napona induciranog u svitku Ms2 za ispravno stanje i kod ekscentriciteta iznosa 25 % zračnog raspora. Na slici 6.26 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4, a na slici 6.27 prikazana je usporedba induciranog napona u svicima Ms1 i Ms3. Analogno, objašnjenja koja su navedena za pomicanje rotora u  $+y$  smjeru vrijede i kod pomicanja rotora u  $+x$  smjeru te dobiveni rezultati samo još jednom potvrđuju točnost i ispravnost iznesenih teza u prethodno razmatranom slučaju. Slika 6.28 prikazuje inducirani napon u preostalim mjernim svicima koji su ugrađeni u zračni raspor stroja prema slici 6.10. Analizom tih valnih oblika može se potvrditi pomak rotora u  $+x$  smjeru, budući da su inducirani naponi u svicima Ms5 i Ms6 veći od napona u Ms7 i Ms8.



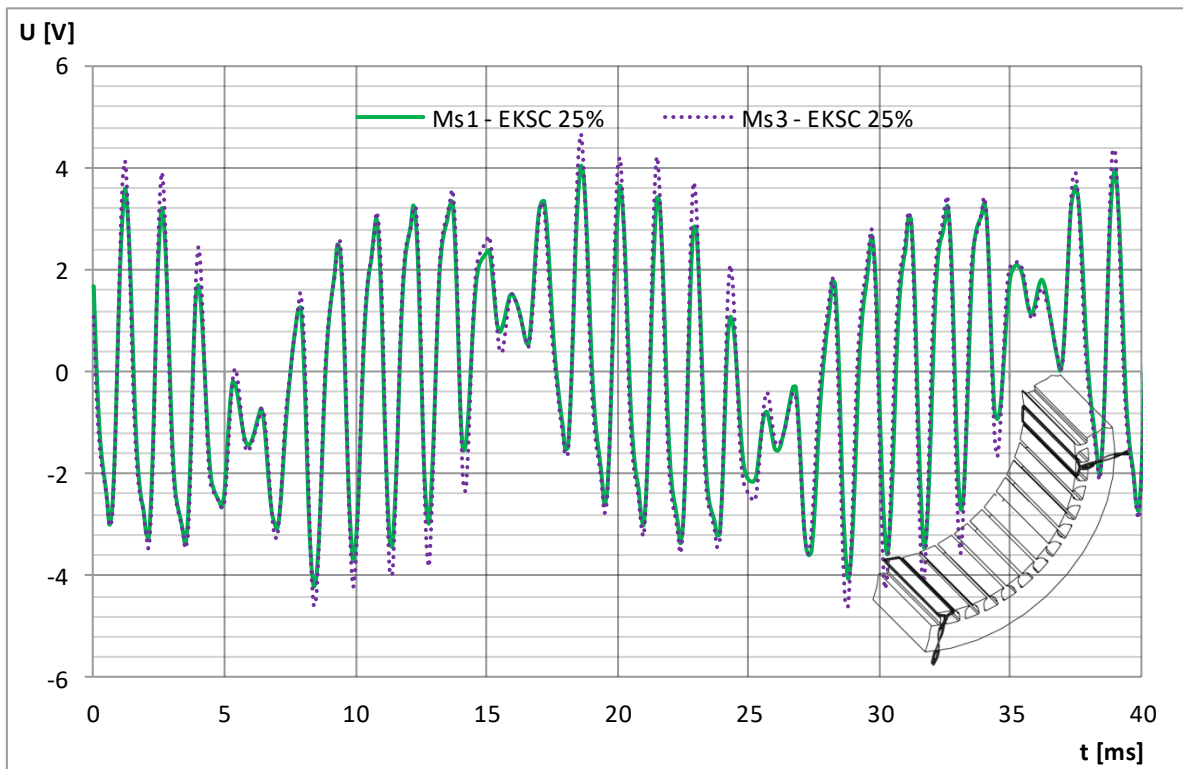
Slika 6.24 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru  $+x$  osi



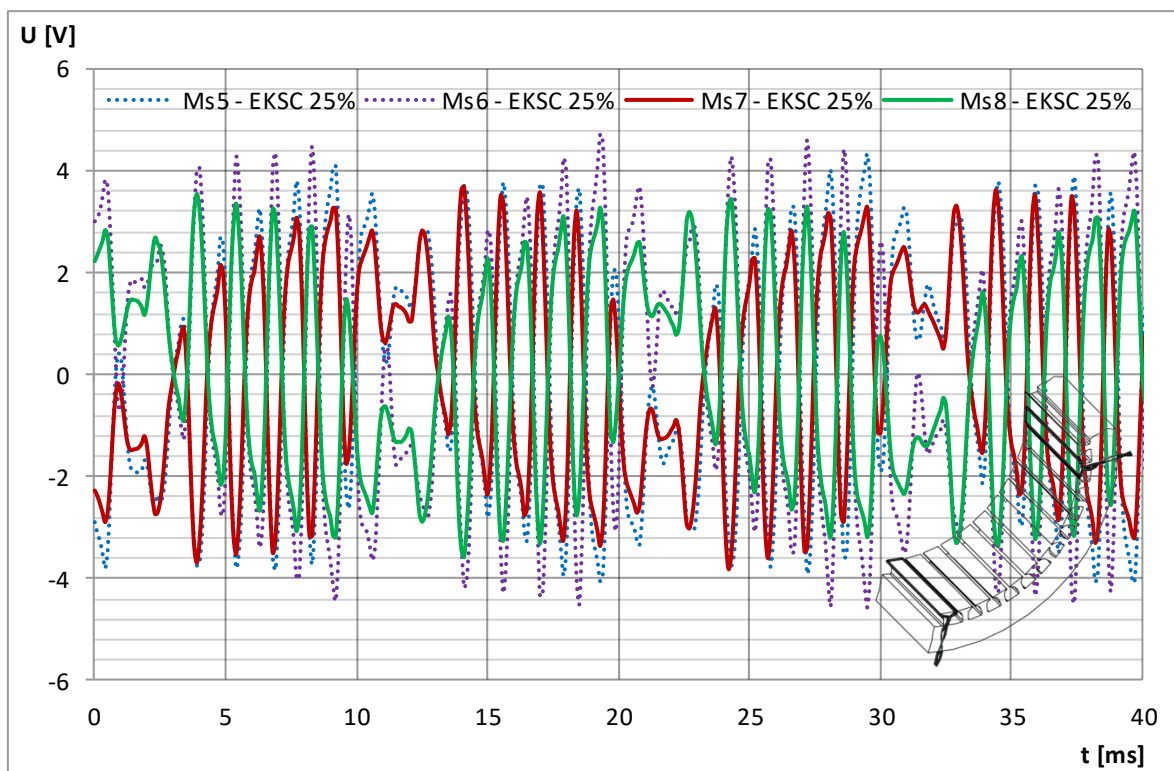
Slika 6.25 Usporedba izmjerenog inducirano napona u mjernom svitku Ms2 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 25 % te pomaka rotora u smjeru  $+x$  osi



Slika 6.26 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 na  $2\tau_p$  za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 25 % (pomak u smjeru + x osi)

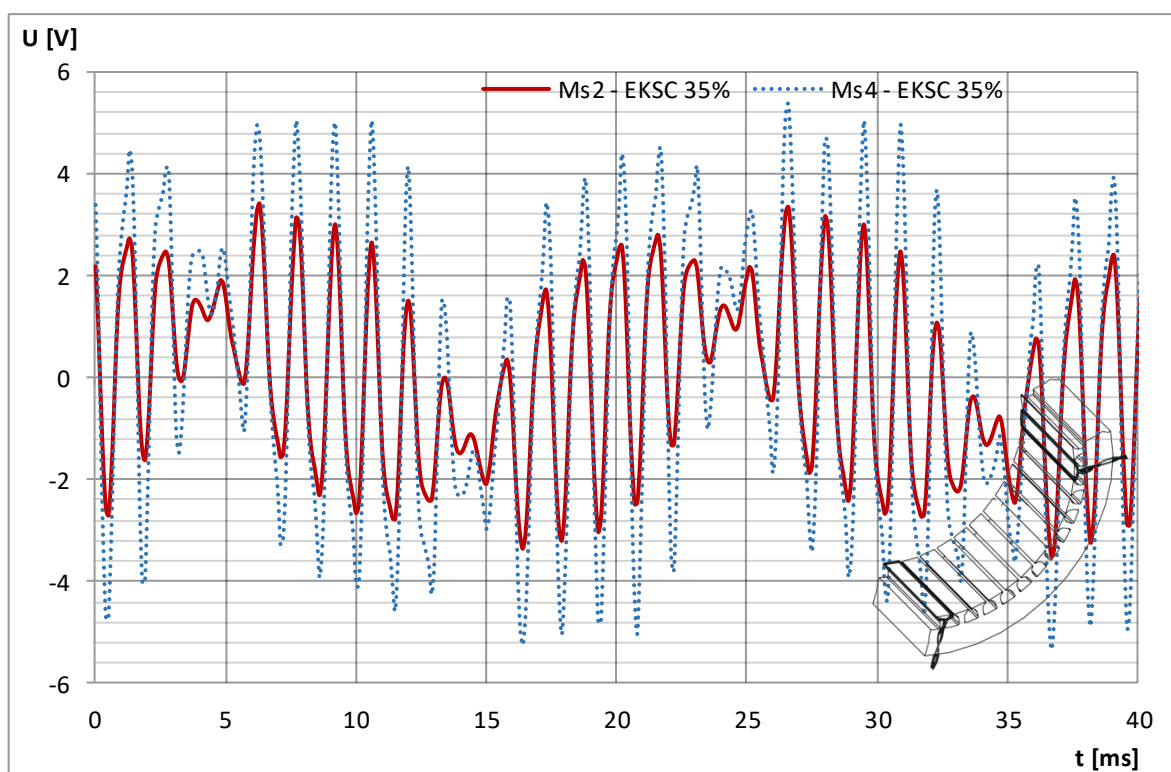


Slika 6.27 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + x osi

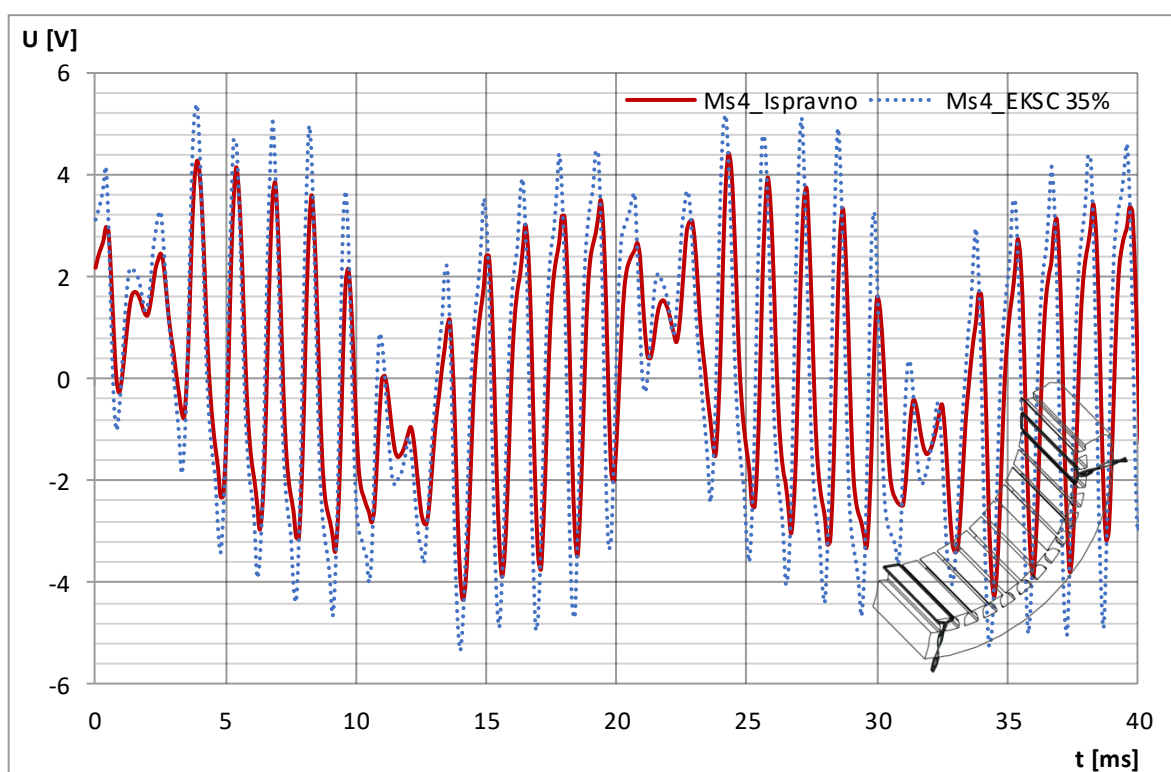


Slika 6.28 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru +  $x$  osi

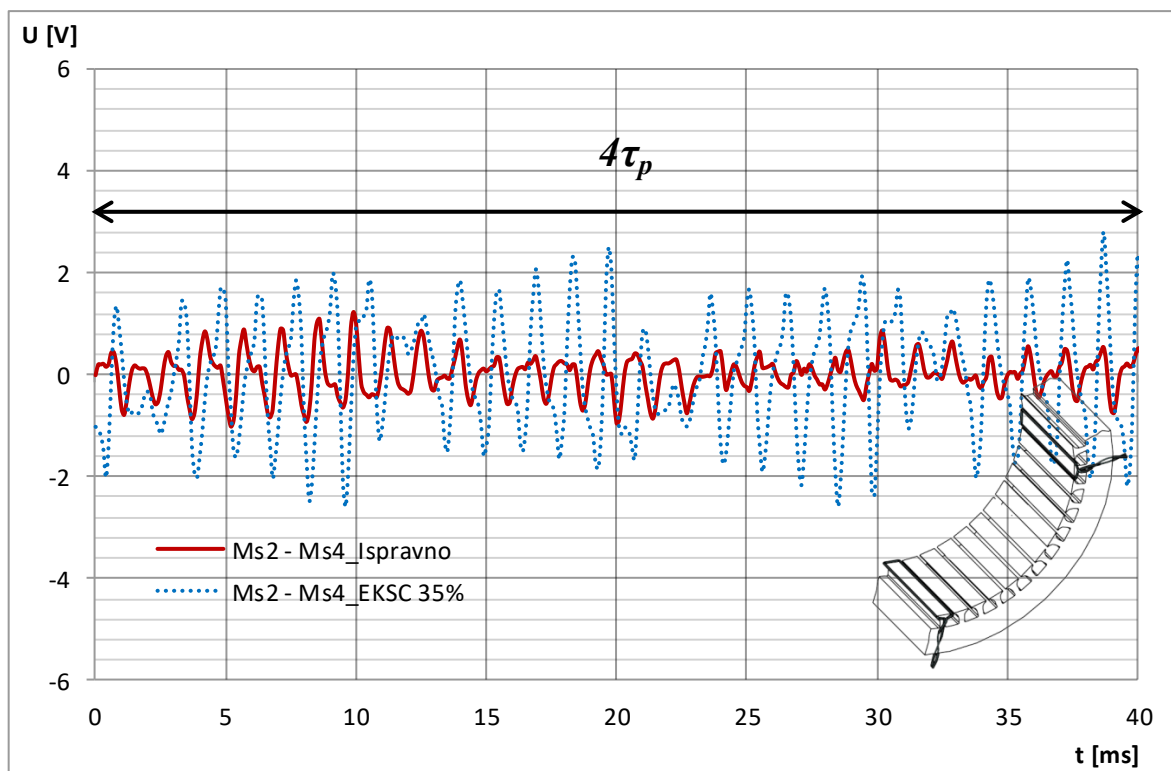
Na slici 6.29 prikazana je usporedba induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 35 % zračnog rasporeda (pomak od 0,35 mm) i pomaka rotora u smjeru  $-x$  osi. Slika 6.30 prikazuje usporedbu valnog oblika napona induciranih u svitku Ms2 za ispravno stanje i kod ekscentriciteta iznosa 35 % zračnog rasporeda. Na slici 6.31 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4, a na slici 6.32 prikazana je usporedba induciranih napona u svicima Ms1 i Ms3. Analogno, objašnjenja koja su navedena za pomicanje rotora u  $+y$  smjeru vrijede i kod pomicanja rotora u  $-x$  smjeru te je jedina razlika ta što je pomicanje rotora ostvareno u drugoj osi te se povećanje induciranih napona očituje u onim mjernim svicima koji se nalaze najbliže rotoru. Slika 6.33 prikazuje inducirani napon u preostalim mjernim svicima koji su ugrađeni u zračni raspored stroja prema slici 6.10. Analizom tih valnih oblika može se potvrditi pomak rotora u  $-x$  smjeru, budući da su inducirani naponi u svicima Ms7 i Ms8 veći od napona u Ms5 i Ms6.



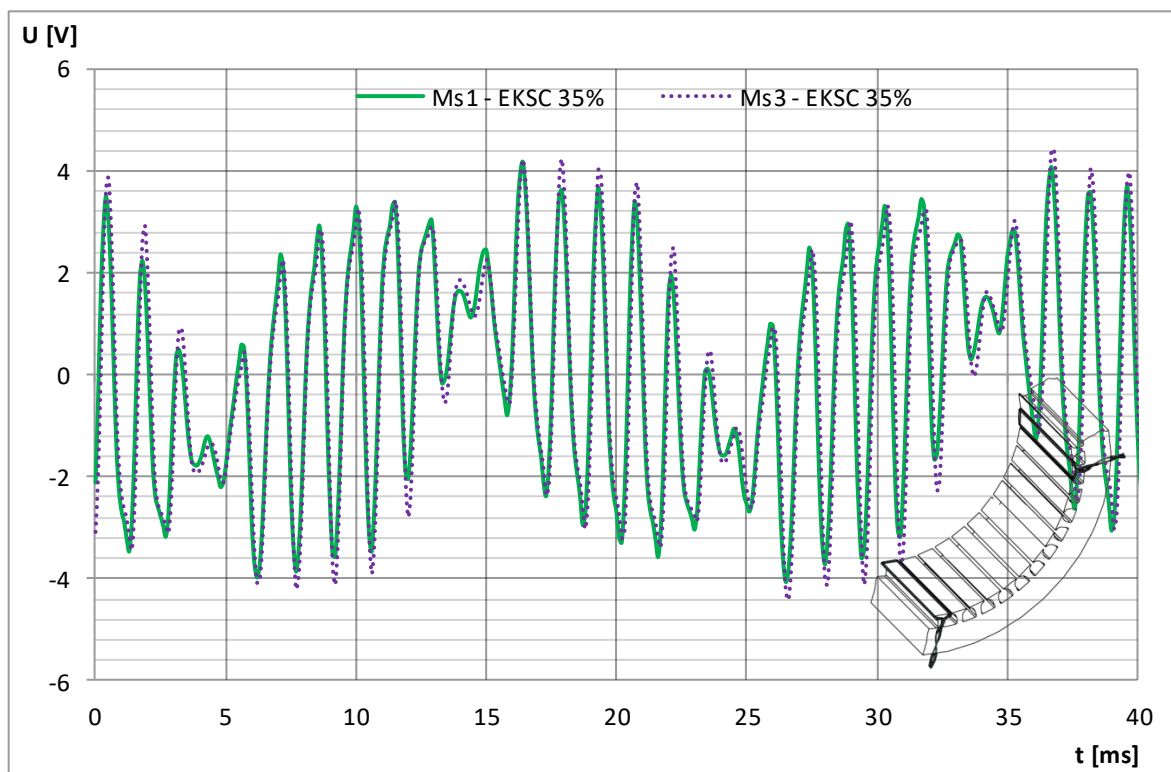
Slika 6.29 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 35 % i pomaka rotora u smjeru –  $x$  osi



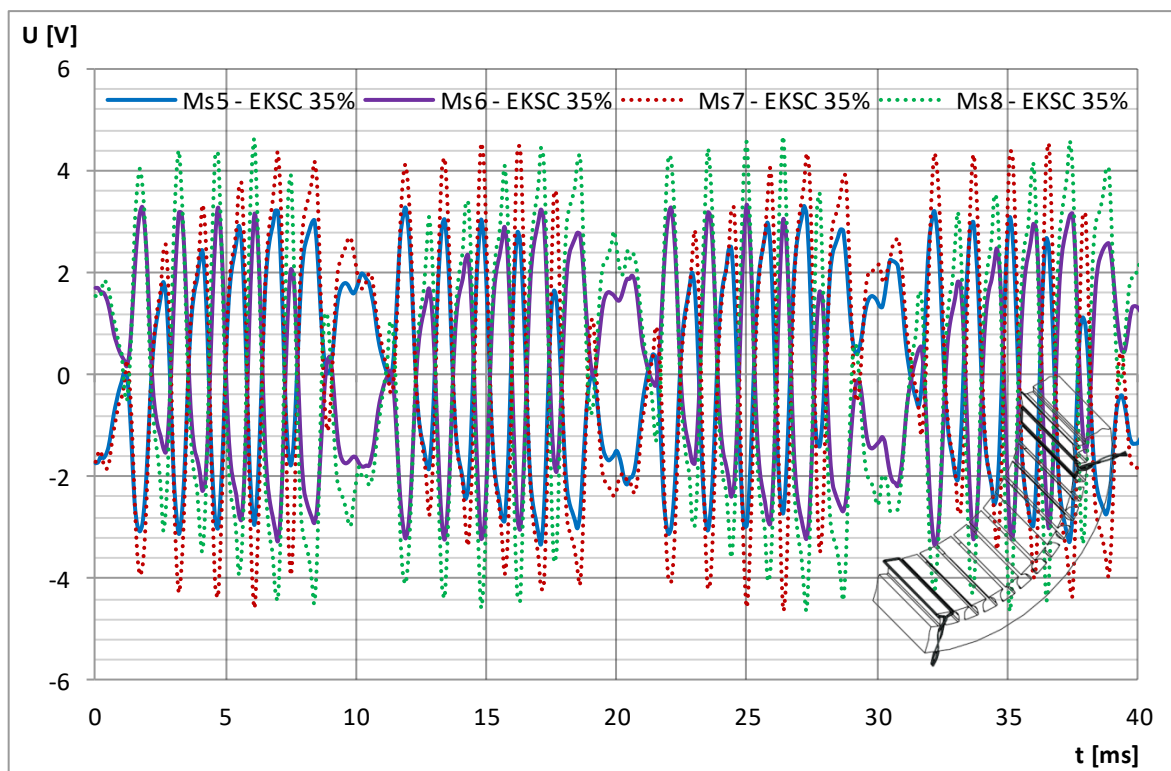
Slika 6.30 Usporedba izmjerenog inducirano napona u mjernom svitku Ms4 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 35 % te pomaka rotora u smjeru –  $x$  osi



Slika 6.31 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 na  $2\tau_p$  za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 35 % (pomak u smjeru  $-x$  osi)



Slika 6.32 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 35 % i pomaka rotora u smjeru  $-x$  osi



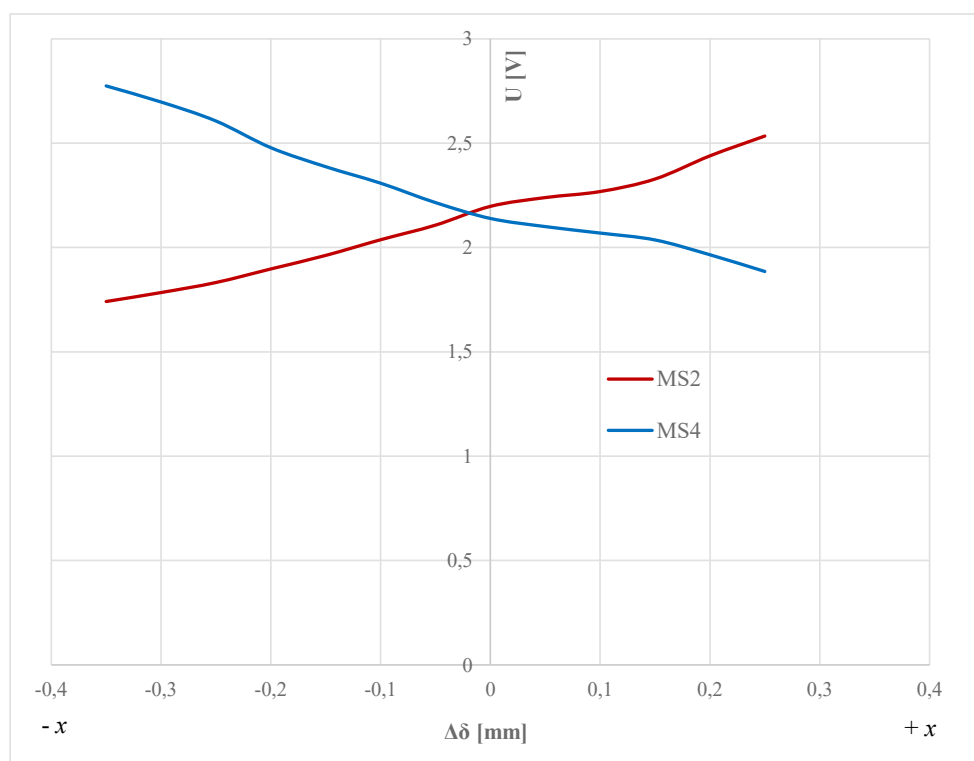
Slika 6.33 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 35 % i pomaka rotora u smjeru –  $x$  osi

Osim pomicanja rotora za 25 % zračnog raspora u smjeru +  $x$  osi i za 35 % u smjeru –  $x$  osi, izvršena su pomicanja i za manje iznose ekscentriciteta. U tablici 6.4 navedeni su ostali iznosi ekscentriciteta sa smjerom pomaka rotora. U istoj tablici navedene su efektivne vrijednosti napona inducirano u svakom pojedinom svitku. Ti naponi su iskorišteni kako bi se mogle izraditi krivulje ovisnosti induciranih napona u pojedinim mjernim svicima o iznosu ekscentriciteta (pomak rotora za određeni postotak veličine zračnog raspora). Ako se analiziraju iznosi napona u tablici 6.4, može se vidjeti da kod statičkog ekscentriciteta u iznosu 35 % zračnog raspora međusobno odstupanje inducirano napona između svitaka Ms2 i Ms4 iznosi skoro 60 %. Također, potrebno je napomenuti da se na osnovu dobivenih podataka mjerenja vidi da mjerni svici smješteni u zračni raspor motora, već i kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 10 %, imaju odstupanje (u ovom slučaju ako se promatraju svici Ms2 i Ms4) veće od 10 %. Ove informacije omogućavaju da se korištenjem mjernih svitaka i analizom efektivne vrijednosti inducirano napona otkriva statički ekscentricitet u samoj ranoj fazi nastajanja i to već kod manjih iznosa.

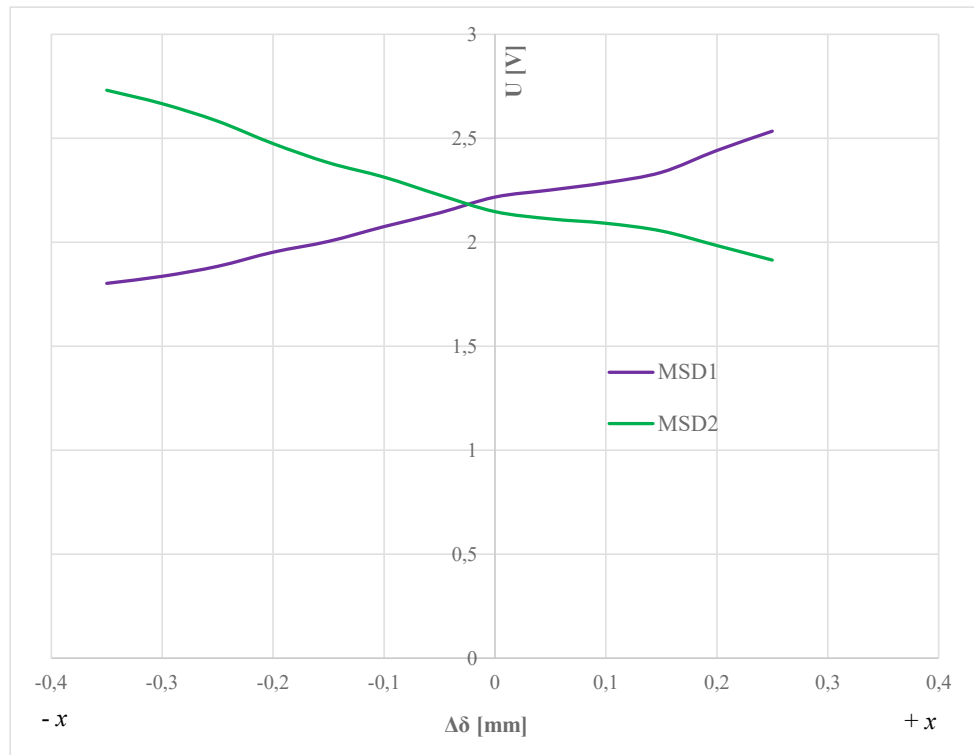
Tablica 6.4 Efektivne vrijednosti izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru

| $\Delta\delta$<br>[mm] | Smjer<br>pomicanja | MS1<br>[V] | MS2<br>[V] | MS3<br>[V] | MS4<br>[V] | MS5<br>[V] | MS6<br>[V] | MS7<br>[V] | MS8<br>[V] | MSD1<br>[V] | MSD2<br>[V] | $\Delta U_{MS2/MS4}$ [%] |
|------------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------------------|
| -0,35                  | prema – x          | 2,119      | 1,741      | 2,187      | 2,774      | 1,892      | 1,875      | 2,518      | 2,619      | 1,802       | 2,731       | 59,33                    |
| -0,30                  | prema – x          | 2,092      | 1,784      | 2,234      | 2,697      | 1,891      | 1,92       | 2,503      | 2,532      | 1,836       | 2,666       | 51,17                    |
| -0,25                  | prema – x          | 2,094      | 1,832      | 2,239      | 2,606      | 1,923      | 1,967      | 2,462      | 2,472      | 1,884       | 2,582       | 42,25                    |
| -0,20                  | prema – x          | 2,085      | 1,897      | 2,242      | 2,478      | 1,961      | 2,024      | 2,391      | 2,382      | 1,952       | 2,474       | 30,62                    |
| -0,15                  | prema – x          | 2,077      | 1,962      | 2,255      | 2,387      | 1,998      | 2,082      | 2,348      | 2,313      | 2,004       | 2,382       | 21,66                    |
| -0,10                  | prema – x          | 2,087      | 2,037      | 2,262      | 2,308      | 2,047      | 2,138      | 2,295      | 2,258      | 2,075       | 2,313       | 13,31                    |
| -0,05                  | prema – x          | 2,071      | 2,107      | 2,267      | 2,215      | 2,08       | 2,206      | 2,258      | 2,190      | 2,141       | 2,227       | 5,12                     |
| 0,00                   | centar             | 2,075      | 2,197      | 2,274      | 2,139      | 2,142      | 2,276      | 2,195      | 2,128      | 2,217       | 2,147       | 2,71                     |
| 0,05                   | prema + x          | 2,071      | 2,239      | 2,272      | 2,100      | 2,16       | 2,304      | 2,169      | 2,097      | 2,251       | 2,112       | 6,62                     |
| 0,10                   | prema + x          | 2,069      | 2,268      | 2,261      | 2,069      | 2,181      | 2,327      | 2,153      | 2,080      | 2,286       | 2,091       | 9,62                     |
| 0,15                   | prema + x          | 2,079      | 2,328      | 2,263      | 2,036      | 2,214      | 2,361      | 2,12       | 2,050      | 2,336       | 2,054       | 14,34                    |
| 0,20                   | prema + x          | 2,087      | 2,439      | 2,261      | 1,965      | 2,281      | 2,438      | 2,07       | 2,000      | 2,441       | 1,984       | 24,12                    |
| 0,25                   | prema + x          | 2,075      | 2,534      | 2,24       | 1,885      | 2,338      | 2,503      | 2,015      | 1,943      | 2,534       | 1,914       | 34,43                    |

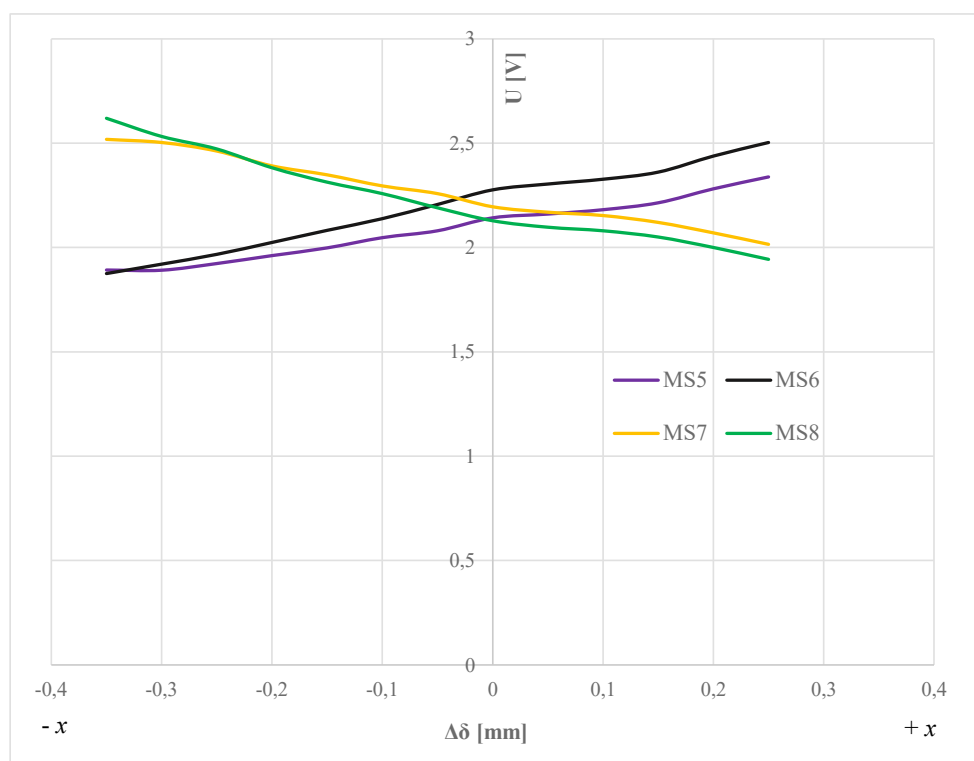
Na slici 6.34 i 6.35 prikazana je krivulja ovisnosti promjene efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 te MSD1 i MSD2 (susjedni svici svicima Ms2 i Ms4) uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru. Promjena efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru prikazana je na slici 6.36, a promjena efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prikazana je na slici 6.37. Iz prikazanih slika može se vidjeti da mjerni svici Ms1 i Ms3 ne reagiraju na promjenu položaja rotora u horizontalnom smjeru, što je i logično, budući da su oni prema slici 6.10 pozicionirani vertikalno. Preostali svici reagiraju na promjenu položaja tako da je kod svitaka Ms2 i Ms4 dobivena najveća osjetljivost promjene induciranih napona, što je i očekivano, budući da su oni postavljeni horizontalno.



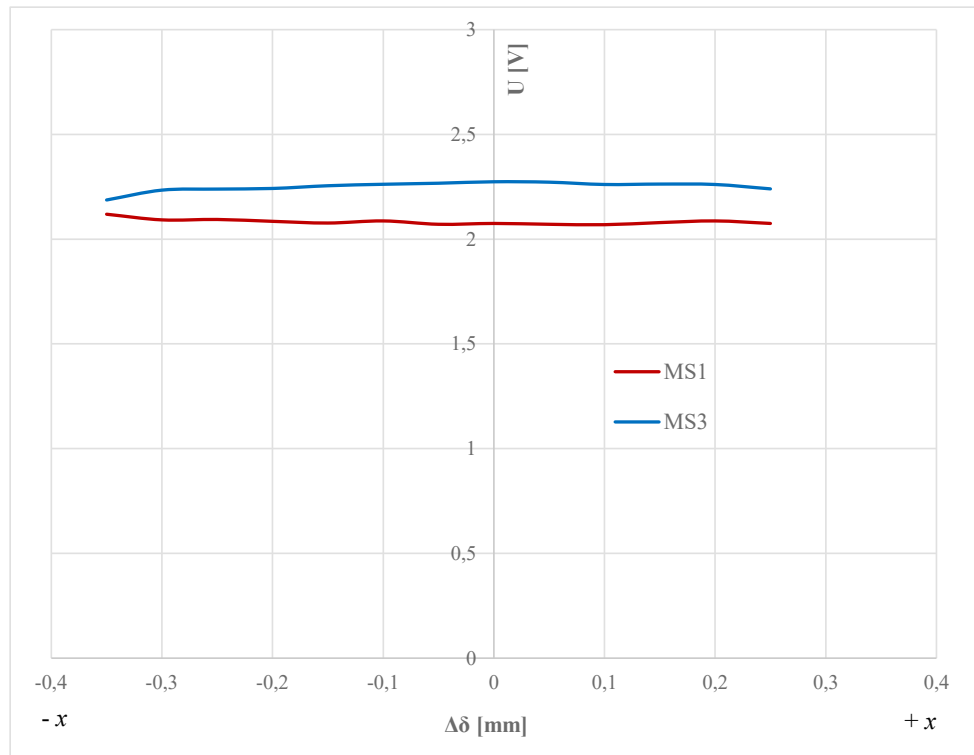
Slika 6.34 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru



Slika 6.35 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranog napona u mjernim svicima MSD1 i MSD2 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru



Slika 6.36 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranog napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru



Slika 6.37 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru

### 6.3. Utjecaj prekida jednog i više štapova kaveza rotora na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima

Sljedeći kvar koji je analiziran mjerenjem je puknuće jednog štapa rotora. Nakon mjerenja i otkrivanja statičkog ekscentriciteta za različite iznose i u različitim smjerovima pomicanja rotora pristupilo se demontaži motora. Demontaža je izvršena kako bi se na rotoru izvršio prekid jednog štapa rotora. Štap je prekinut na dijelu koji se nalazi van utora rotora, tj. na samom spoju štapa s prstenom, što je prikazano na slici 6.38. Mjesto prekida štapa prikazano slikom odabrano je jer je to mjesto gdje u stvarnosti najčešće dolazi do pucanja štapa rotora. Najčešći uzroci pucanja štapa su uslijed termičkih, električnih i mehaničkih naprezanja (primjerice loša kvaliteta zavara na mjestu spoja štapa i prstena).



Slika 6.38 Mjesto na kaveznom namotu gdje je prekinut jedan štap rotora – područje tik uz prsten

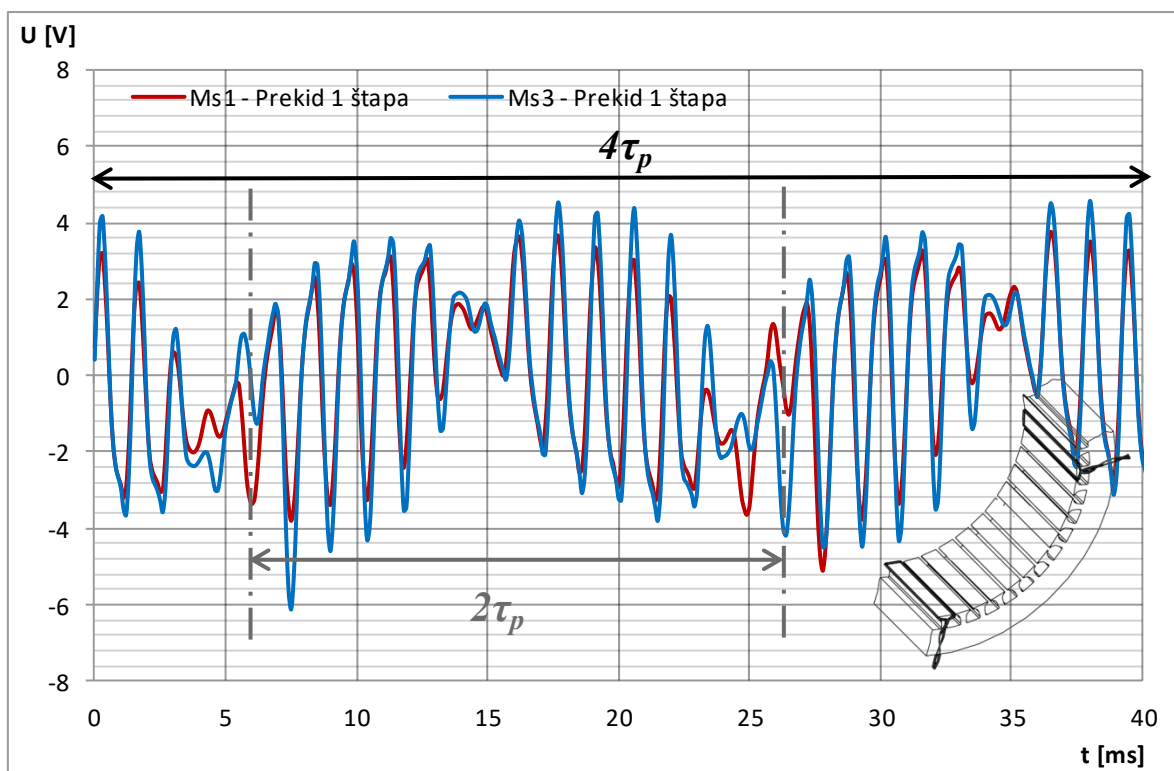
Mjerenje uz prekinuti štap rotora provedeno je kod istog opterećenja motora kao i u slučaju mjerenja kod statičkog ekscentriciteta rotora (tablica 6.5).

Tablica 6.5 Uvjeti kod mjerenja na motoru s prekinutim jednim štapom rotora

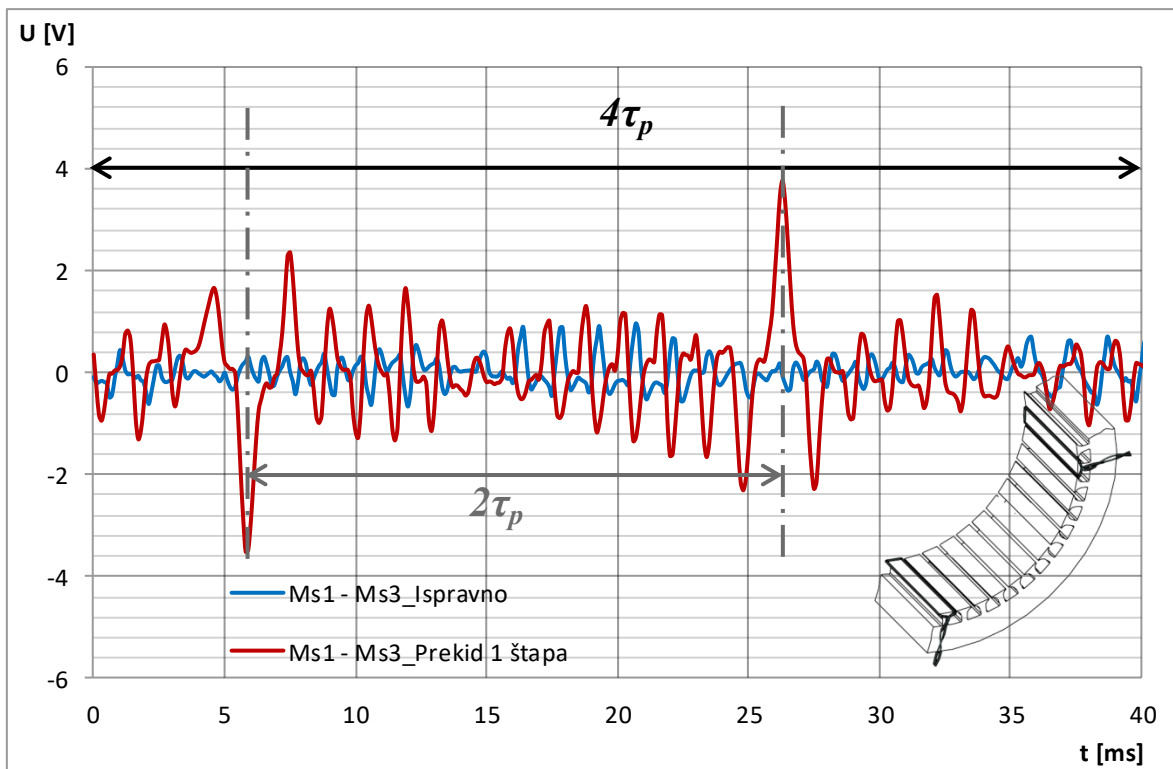
| Uvjeti opterećenja motora |          |         |          |               |
|---------------------------|----------|---------|----------|---------------|
| $U_n$ [V]                 | $f$ [Hz] | $I$ [A] | $P$ [kW] | $\cos\varphi$ |
| 276                       | 50       | 136     | 55       | 0,85          |

Slika 6.39 prikazuje inducirani napon u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su razmaknuti za  $2\tau_p$ , kod prekida jednog štapa rotora. Ukoliko bi se analizirali samo inducirani naponi, teško bi bilo zaključiti samo na osnovu valnog oblika postoji li prekid štapa ili ne. Primjenom metode oduzimanja induciranih napona kao što je opisano u poglavlju 4 i to na način prikladan za mjerne svitke razmaknute za  $2\tau_p$ , dobiva se valni oblik kakav je prikazan na slici 6.40. Na slici se

uočavaju za jedan okret stroja dva karakteristična porasta napona koja upućuju na prekid štapa kaveza. Ta dva porasta napona dobivena oduzimanjem induciranih napona u Ms1 i Ms3 međusobno su udaljena za  $2\tau_p$  što je jasno naznačeno na slici. Na slici 6.40 prikazana je razlika napona za jedan puni okret rotora ( $4\tau_p$  što odgovara vremenskom intervalu od 40 ms) te su zato vidljiva dva karakteristična porasta napona.



Slika 6.39 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod prekida jednog štapa rotora



Slika 6.40 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ispravnom stanju i kod prekida jednog štapa rotora

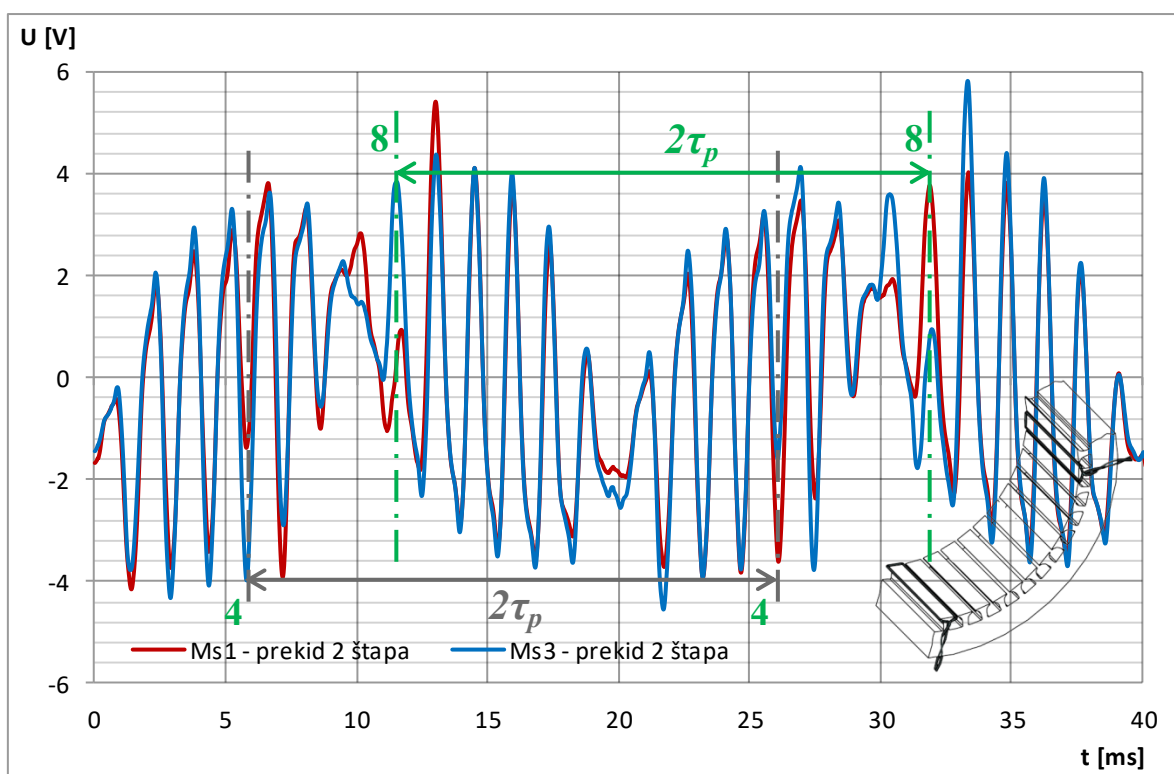
Sljedeća vrsta kvara kaveznog rotora koji je utvrđivan mjerenjem je prekid dva štapa. Za prekid su odabrani štapovi prikazani slikom 6.41, koji su međusobno razmaknuti kao i štapovi koji su prekinuti u MKE modelu motora za koji je proveden numerički proračun. Razlog rezanja upravo tih štapova bio je da se kasnije može napraviti usporedba rezultata mjerenja i proračuna te stoga imaju iste oznake štapova (štap broj 4 i 8) kao što je i u MKE modelu.



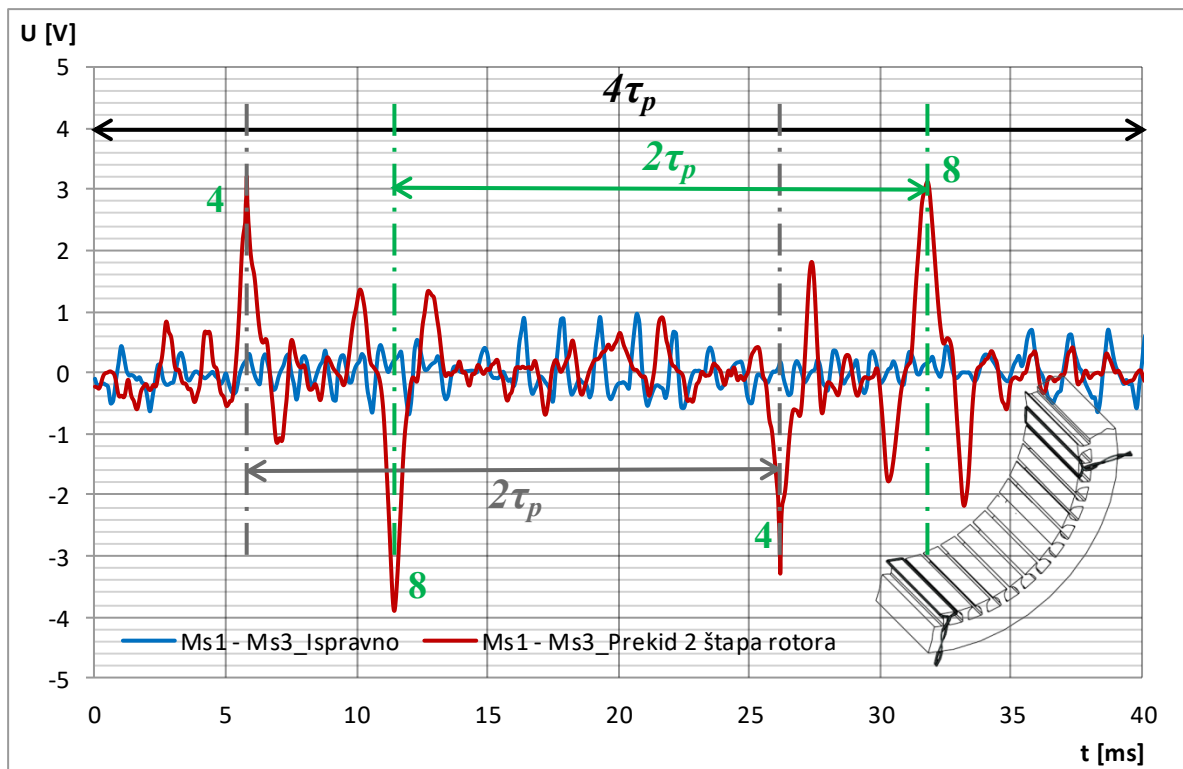
Slika 6.41 Mjesto na kaveznom namotu gdje su prekinuta dva štapa rotora – područje tik uz prsten

Na slici 6.42 prikazan je inducirani napon u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su međusobno razmaknuti za  $2\tau_p$ , kod prekida dva štapa rotora. Kao i kod prekida jednog štapa, ako bi se analizirali samo inducirani naponi, teško bi bilo zaključiti samo na osnovi valnog oblika napona postoji li prekid više štapa ili ne.

Ponovno, primjenom metode oduzimanja induciranih napona i to na način prikladan za mjerne svitke razmaknute za  $2\tau_p$ , dobiva se valni oblik kakav je prikazan na slici 6.43. Analizom valnog oblika sa slike, uočavaju se za jedan okret stroja četiri karakteristična porasta napona koja upućuju na prekid dva štapa kaveza. Prema tome, prilikom nailaska prekinutog štapa broj 4 na mjerni svitak Ms1 nastaje prvi porast napona, dok drugi porast nastaje kada na mjerni svitak Ms1 nailazi štap broj 8. Druga dva porasta napona nastaju točno za  $2\tau_p$  kada štaponi broj 4 i 8 nailaze na mjerni svitak Ms3. Na slici 6.43 prikazane su razlike napona za jedan puni okret rotora ( $4\tau_p$  odnosno vremenski interval od 40 ms) te su zato vidljiva četiri karakteristična porasta napona.



Slika 6.42 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod prekida dva štapa rotora

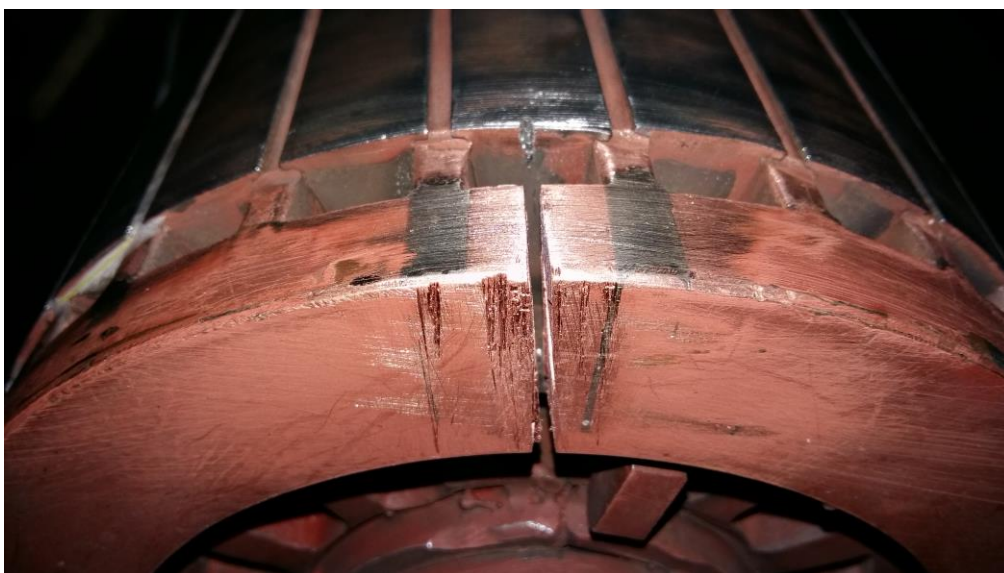


Slika 6.43 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ispravnom stanju i kod prekida dva štapa rotora

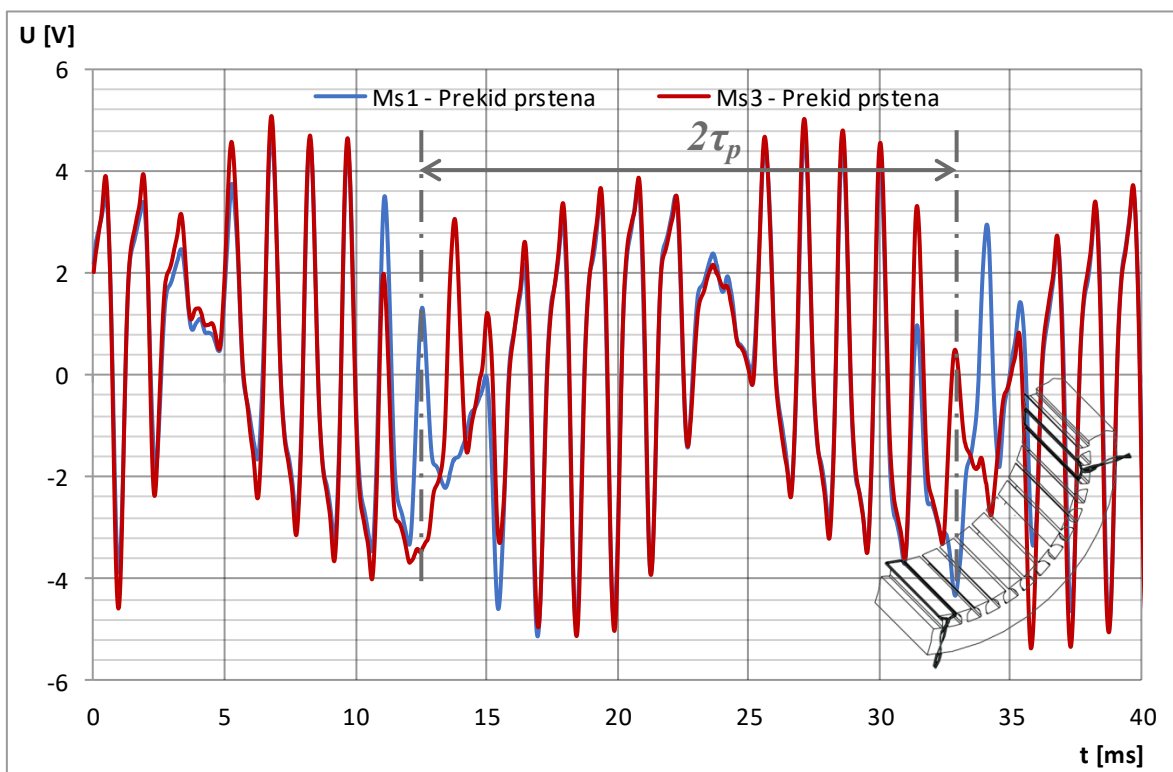
#### 6.4. Utjecaj prekida prstena kaveza rotora na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima

Posljednja vrsta kvara rotora koja je zasebno analizirana mjerenjem je prekid prstena kaveznog namota. Slika 6.44 prikazuje rotor na kojem je napravljen prekid prstena. Usporedba napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod prekida prstena, a koji su međusobno razmaknuti za dvostruki polni korak prikazana je na slici 6.45. U slučaju kada bi se uspoređivali samo inducirani naponi, ponovno bez složene obrade signala ne bi bilo moguće jednostavno utvrditi prekid prstena, stoga je opet primijenjena metoda oduzimanja induciranih napona. Na slici 6.46 prikazan je valni oblik napona dobiven oduzimanjem induciranih napona u Ms1 i Ms3 na  $2\tau_p$ . Analizom valnog oblika može se uočiti da se u razlici napona pojavljuju karakteristični porasti napona koji su međusobno udaljeni za  $2\tau_p$ . Na temelju ovako dobivenoga valnog oblika može se vrlo pouzdano i bez složene obrade signala, utvrditi i prekid prstena kaveznog namota. Budući da se ovaj valni oblik napona razlikuje od valnog oblika dobivenog kod prekida jednog ili više štapova te pojave statičkog ekscentriciteta, može se zaključiti da je osim otkrivanja kvara, moguće pouzdano utvrditi i o kojoj je vrsti kvara rotora riječ. U odnosu na prekid štapova, raspoznavanje ovog kvara je moguće zato jer u slučaju prekida više štapova pojava porasta napona događa se točno za  $\Delta t = 1,42$  ms (slučaj

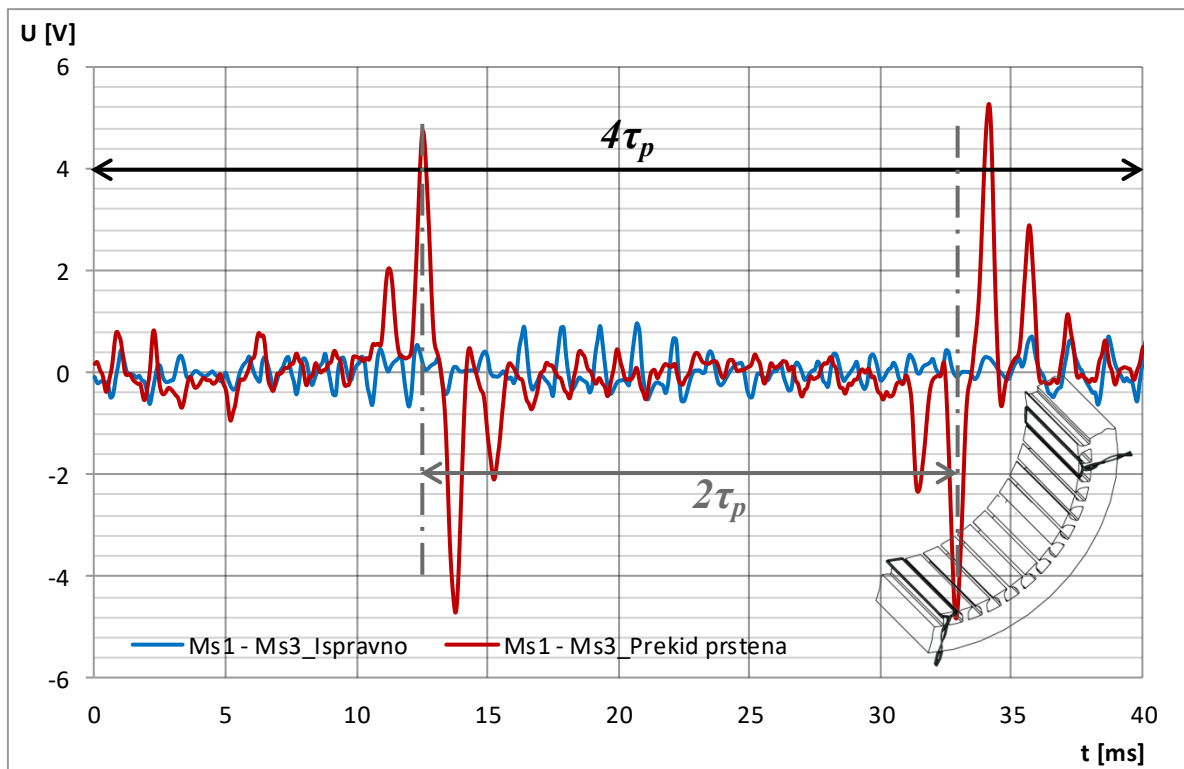
prekida dva susjedna štapa) ili za njegov višekratnik (primjerice za slučaj prekida štapova 4 i 8 taj vremenski interval iznosi 5,68 ms). U slučaju prekida prstena pojava dvaju neposrednih karakterističnih porasta je strogo manja od vremenskog intervala iznosa 1,42 ms te iznosi 1,2 ms. Stoga se u obradi naponskih signala, u sklopu algoritma za otkrivanje kvarova rotora međusobno mogu razlučiti ova dva karakteristična kvara rotora motora. Rezultati dobiveni mjerenjem u skladu su s rezultatom dobivenim MKE proračunom za ovaj kvar.



Slika 6.44 Kavezni namot – mjesto prekida prstena rotora



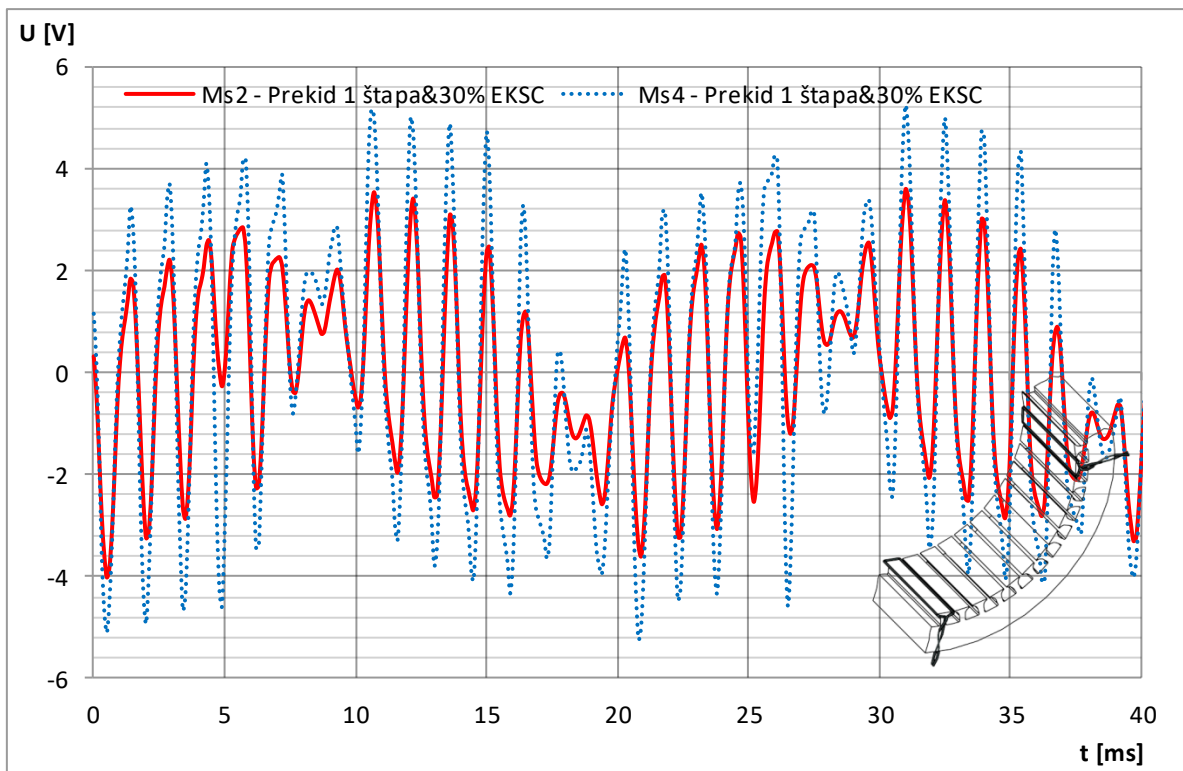
Slika 6.45 Usporedba izmjerenih napona induciranih u svicima Ms1 i Ms3 kod prekida prstena



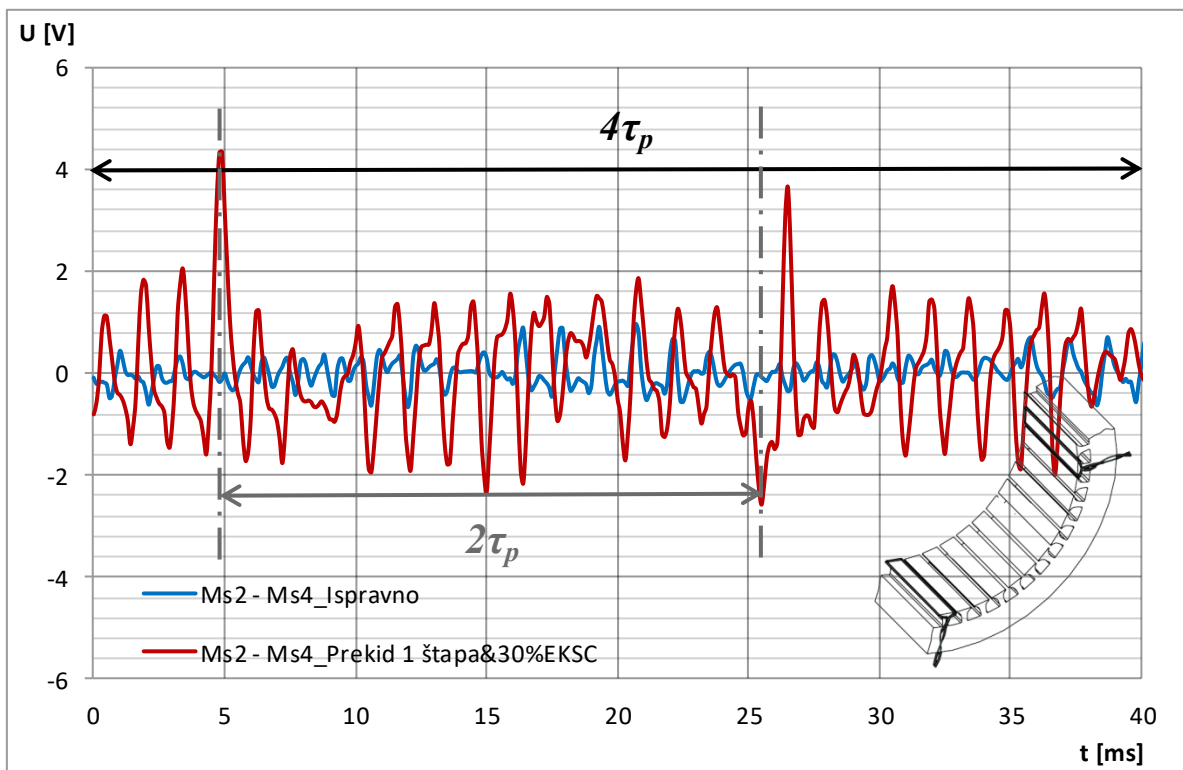
Slika 6.46 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ispravnom stanju i kod prekida prstena rotora

### 6.5. Utjecaj prekida jednog štapa kaveza rotora uz prisutnost statičkog ekscentriciteta na izmjerene inducirane napone u mjernim svicima

U svrhu prepoznavanja pojedine vrste kvara rotora motora, napravljeno je i jedno mjerenje kada su u motoru istovremeno prisutna dva kvara. Analizirana je kombinacija kvarova i to prekid jednog štapa uz prisutan statički ekscentricitet iznosa 30 % zračnog raspora s pomakom u smjeru  $-x$  osi. Slika 6.47 prikazuje inducirani napon u mjernim svicima Ms2 i Ms4 koji su međusobno razmaknuti za  $2\tau_p$ . Budući da je prisutan statički ekscentricitet rotora i to pomak u smjeru  $-x$  osi, na slici se može vidjeti da je napon induciran u Ms4, kontinuirano, za cijeli okret rotora, po apsolutnom iznosu, veći od napona induciranog u Ms2. Ukoliko se primijeni metoda oduzimanja napona induciranih u mjernim svicima, dobiva se valni oblik napona prikazan na slici 6.48.

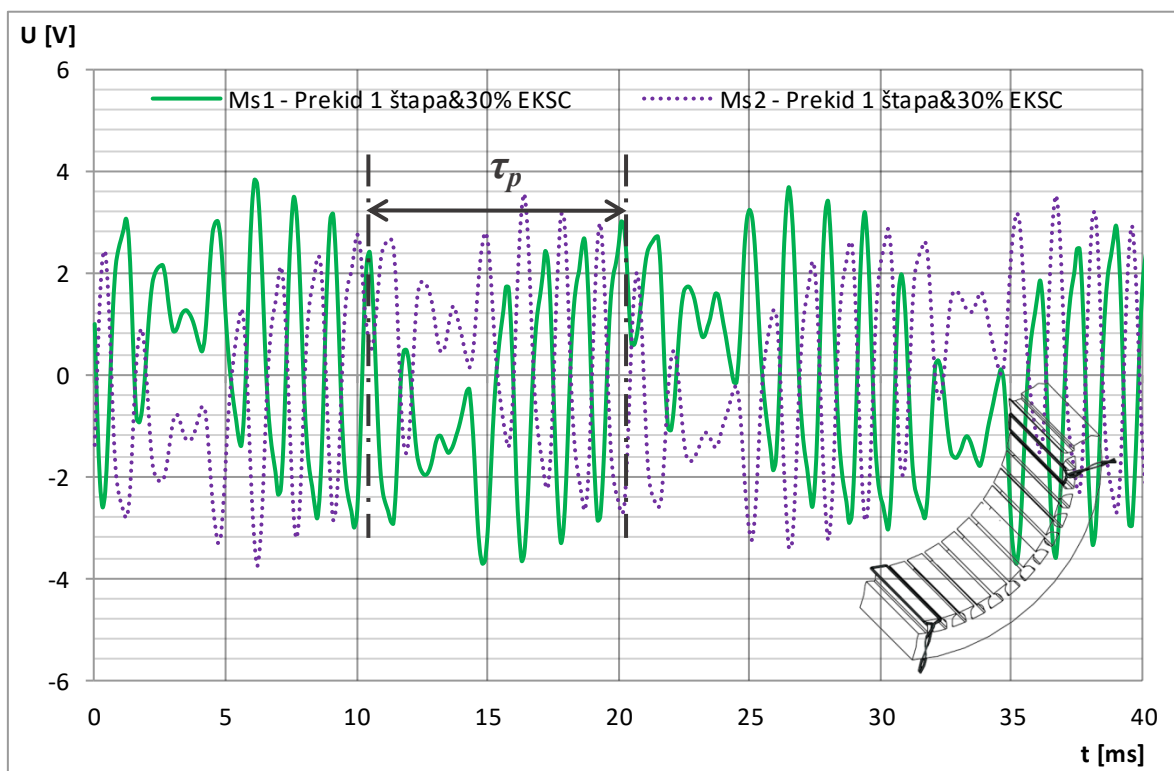


Slika 6.47 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 %

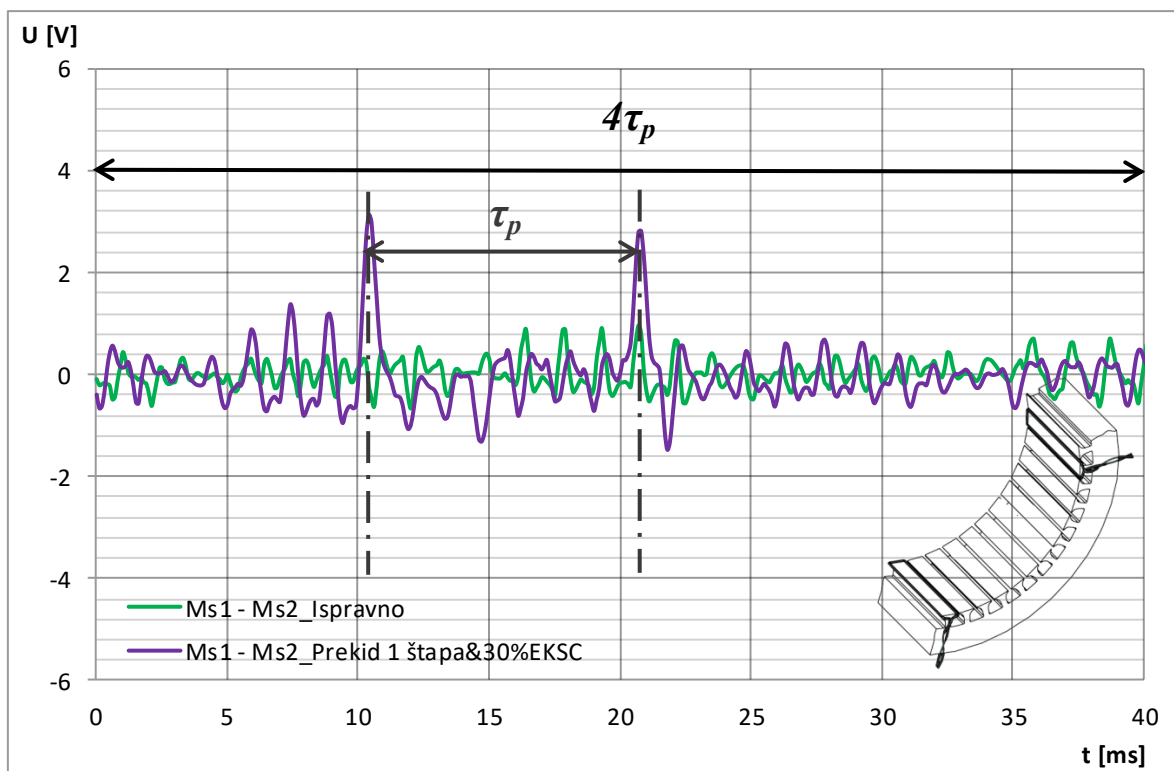


Slika 6.48 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 u ispravnom stanju te kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 %

Analizom valnog oblika napona dobivenog oduzimanjem može se vidjeti da su u valnom obliku prisutni karakteristični porasti napona koji su međusobno pomaknuti za  $2\tau_p$ , a posljedica su prekida jednog štapa rotora. Valja napomenuti da kod iznosa ekscentriciteta od 30 % postoji više porasta napona koji mogu zamaskirati poraste napona uzrokovane prekidom štapa. U slučaju kombinacije kvarova potrebno je dodatno analizirati i valne oblike induciranog napona u Ms1 i Ms2 koji su prikazani na slici 6.49. Budući da je opet bez složene obrade podataka teško zaključiti postoji li kvar ili ne, ponovno je primijenjena metoda oduzimanja induciranih napona i to na način prikladan za mjerne svitke razmaknute za  $\tau_p$ . Nakon međusobnog oduzimanja induciranih napona dobiven je valni oblik prikazan na slici 6.50. Ukoliko se promotri dobiveni valni oblik napona, mogu se vidjeti dva karakteristična porasta napona koja upućuju da je prekinut jedan štap. Budući da su naponi u Ms1 i Ms2, ukoliko se međusobno uspoređuju, manje osjetljiviji na ekscentricitet, moguće je ovakvom analizom dodatno potvrditi da u motoru postoje dvije vrste kvara rotora.



Slika 6.49 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms2 kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 %



Slika 6.50 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms2 u ispravnom stanju te kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 %

Dakle, rezultati mjerenja za svaki pojedni kvar rotora pokazali su da se izmjerenim induciranim naponima u mjernim svicima može zasebno otkriti kvar rotora. Svaki kvar u mjernim svicima inducira napone koji zajedno u kombinaciji s primjenom metode oduzimanja induciranih napona uzrokuju takve svojstvene karakteristične valne oblike napona koji omogućavaju točno otkrivanje i raspoznavanje pojedinog kvara kaveznog rotora motora. *Kao i u slučaju MKE proračuna pokazano je da za otkrivanje i raspoznavanje kvarova, potrebno u motor ugraditi najmanje četiri mjerna svitka međusobno razmaknuta za polni korak  $\tau_p$ .*

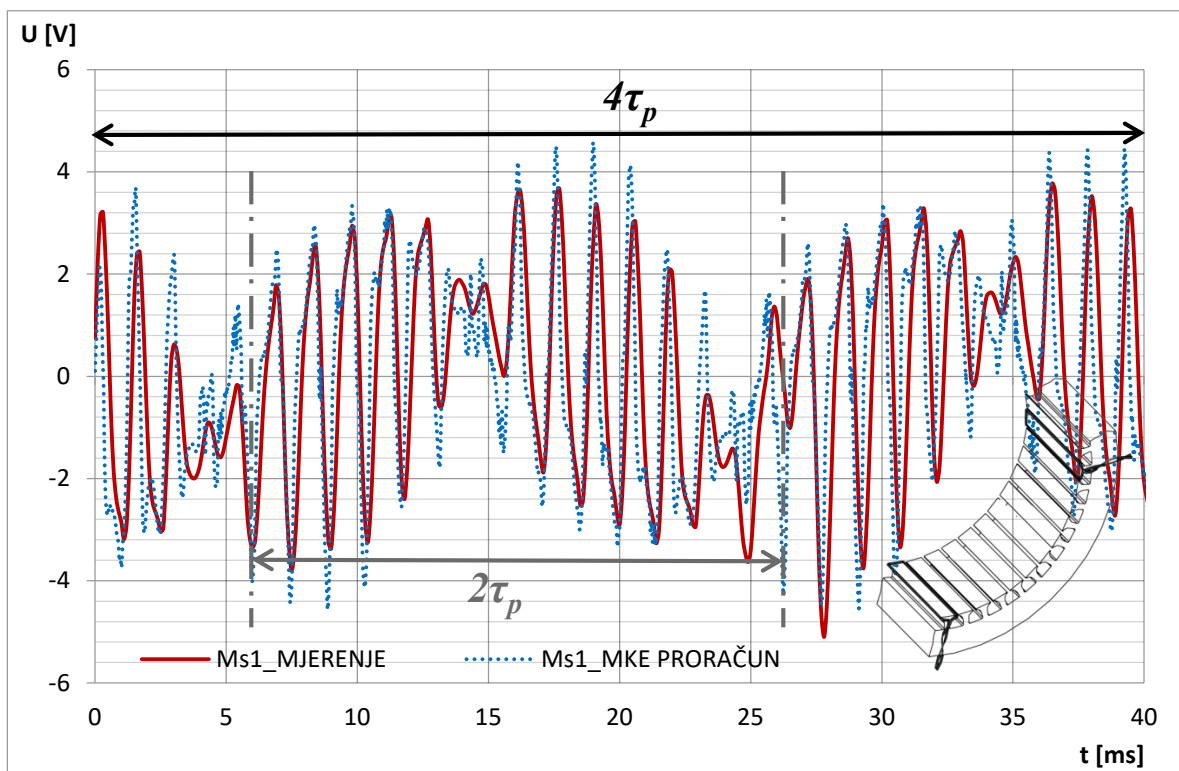
## **7. Usporedba induciranih napona u mjernim svicima dobivenih proračunima i mjerenjima**

U ovom poglavlju dan je kratki pregled usporedbe rezultata dobivenih MKE proračunom i mjerenjem na motoru za nekoliko karakterističnih vrsta kvarova. U nastavku su prikazani rezultati usporedbe za sljedeće vrste kvarova:

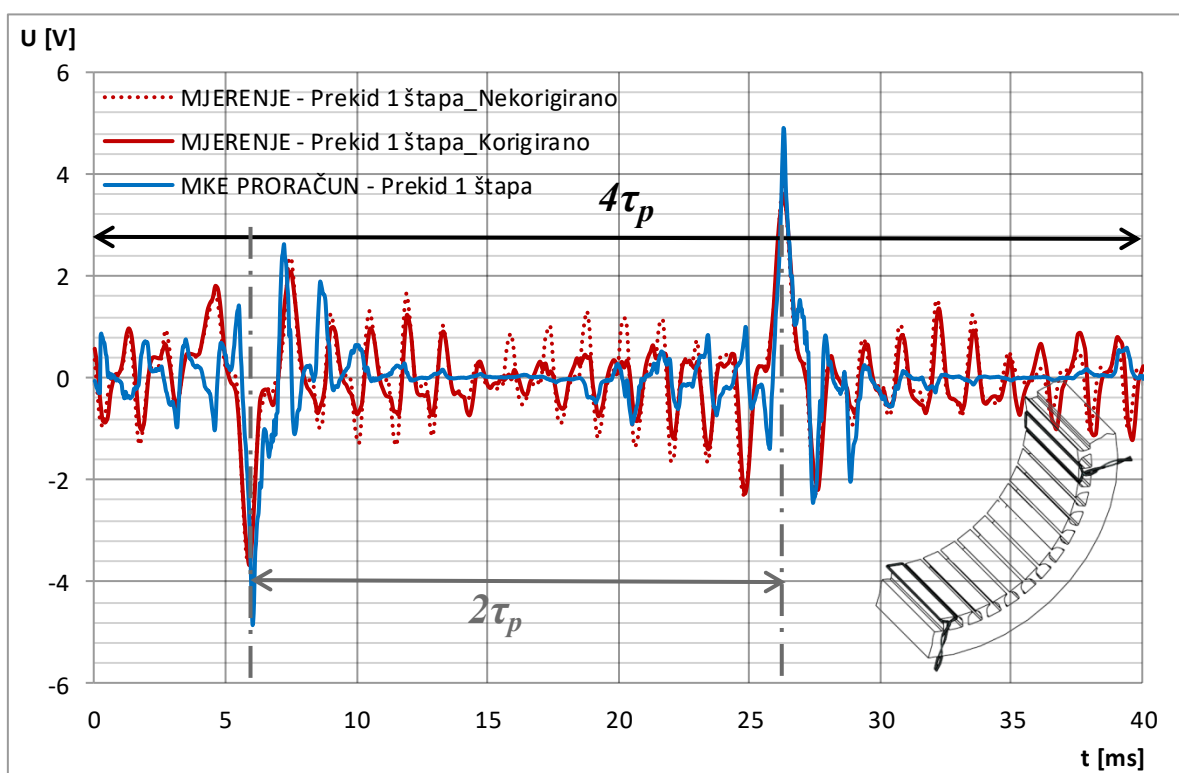
- prekid jednog štapa kaveznog rotora,
- prekid dva štapa kaveznog rotora,
- prekid prstena kaveznog rotora,
- pojava statičkog ekscentriciteta iznosa 25 % zračnog raspora.

### ***7.1 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod prekida jednog štapa rotora***

Analizirana je usporedba rezultata MKE proračuna i mjerenja za kvar rotora i to prekid jednog štapa kaveznog namota. Slika 7.1 prikazuje usporedbu napona induciranih u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem na motoru u laboratoriju. Iz usporedbe valnih oblika može se vidjeti da je postignuto dobro slaganje rezultata proračuna i mjerenja po valnom obliku, dok postoji odstupanje u amplitudi induciranih napona. Na slici 7.2 prikazana je usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida jednog štapa rotora. Također na istoj slici prikazna je i razlika induciranih napona dobivena mjerenjem, a koja je korigirana izmjerenom razlikom napona dobivenom za slučaj rada motora u ispravnom stanju. Taj valni oblik razlike napona je na slici 7.2 prikazan isprekidanom crvenom linijom. Ova korekcija je provedena iz razloga kako bi se u razlici napona dobivenoj za slučaj kvarnog stanja rotora (prekid štapa), eliminirao utjecaj napona greške (napon koji je posljedica nesavršenosti ugradnje mjernih svitaka i tolerancija u izradi strojeva) te time dobili točniji rezultati mjerenja. Ukoliko se sa slike promotre valni oblici razlike napona, korigirani valni oblik u odnosu na nekorigirani je točniji u usporedbi s valnim oblikom dobivenim MKE proračunom. Nadalje, analizom valnih oblika sa slike utvrđeno je dobro slaganje rezultata mjerenja i proračuna po valnom obliku (osobito na onom dijelu valnog oblika gdje porast napona upućuje na pojavu kvara rotora), s time da ipak postoji maksimalno odstupanje u veličini napona koje u ovom slučaju iznosi 18 %. Dobiveno odstupanje odnosi se ustvari na iznos porasta napona (maksimalni vrh napona) koji u razlici napona dvaju svitaka upućuje na pojavu prekida jednog štapa.



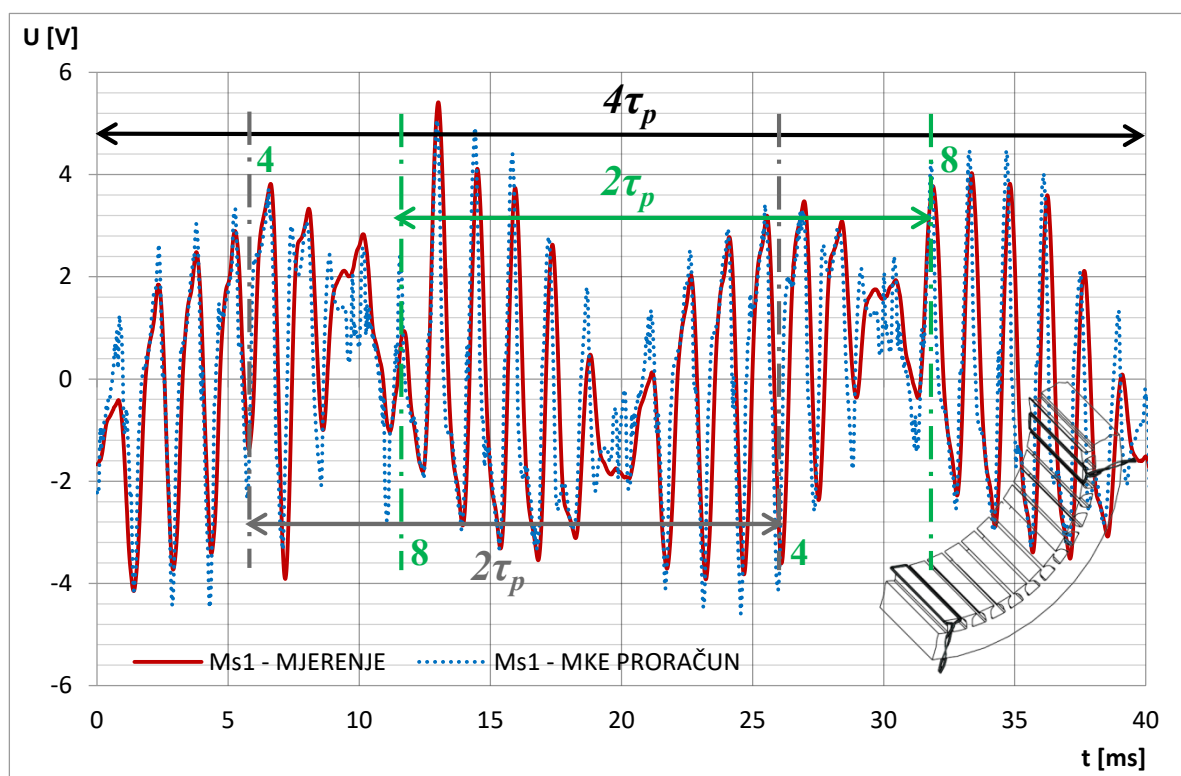
Slika 7.1 Usporedba napona induciranog u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida jednog štapa rotora



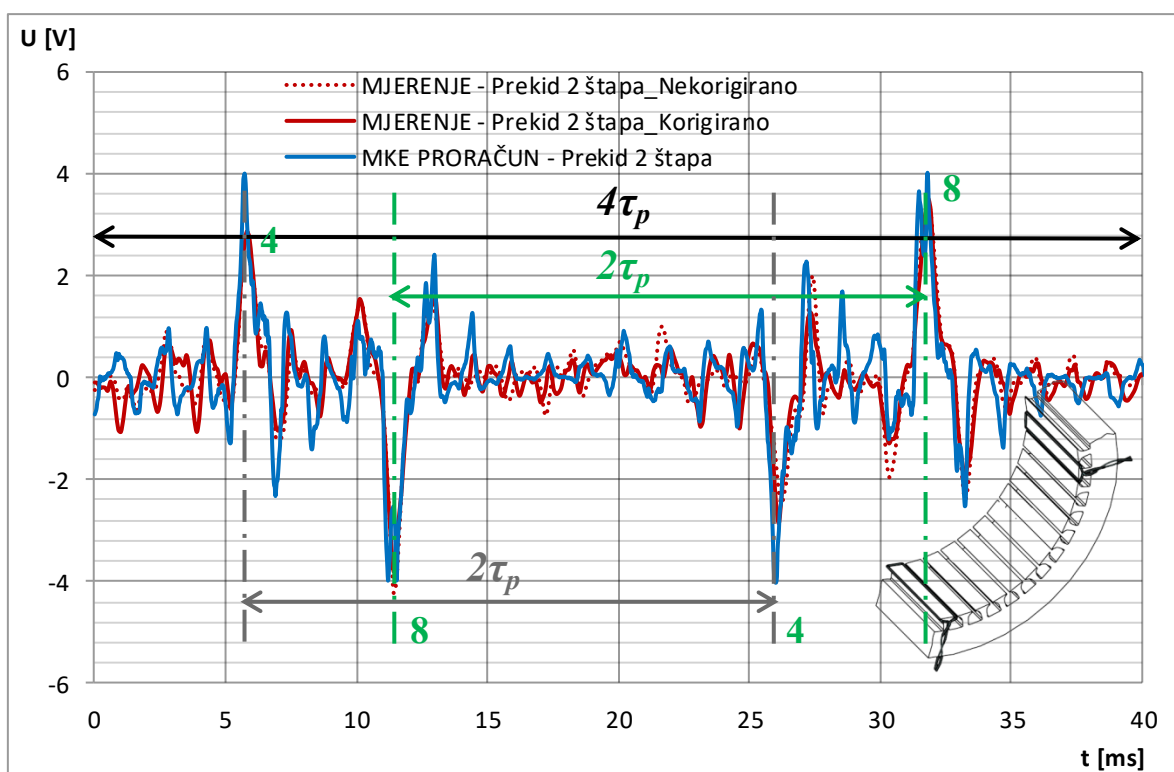
Slika 7.2 Usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida jednog štapa rotora

## 7.2 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod prekida dva štapa rotora

Analizirana je usporedba rezultata MKE proračuna i mjerenja za kvar rotora i to prekid dva štapa kaveznog namota. Slika 7.3 prikazuje usporedbu napona induciranih u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem na motoru u laboratoriju. Iz usporedbe valnih oblika može se vidjeti da je postignuto dobro slaganje rezultata proračuna i mjerenja po valnom obliku, dok postoji vrlo malo odstupanje u veličini induciranih napona. Na slici 7.4 prikazana je usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida dva štapa rotora. Također je na slici prikazana i razlika induciranih napona dobivena mjerenjem i korigirana izmjerenom razlikom napona dobivenom u ispravnom stanju. Na slici je taj valni oblik prikazan isprekidanom crvenom linijom. Korekcija je provedena iz istog razloga kao i u prethodnom slučaju s ciljem postizanja bolje točnosti. Analizom valnih oblika utvrđeno je dobro slaganje rezultata mjerenja i proračuna po valnom obliku (osobito na dijelu valnog oblika gdje porasti napona upućuju na pojavu kvara), s time da ipak postoji odstupanje u veličini napona koje za ovaj analizirani slučaj iznosi 5 %. Dobiveno odstupanje odnosi se na iznos porasta napona (maksimalni vrh napona) koji u razlici napona dvaju svitaka upućuje na pojavu prekida dva štapa.



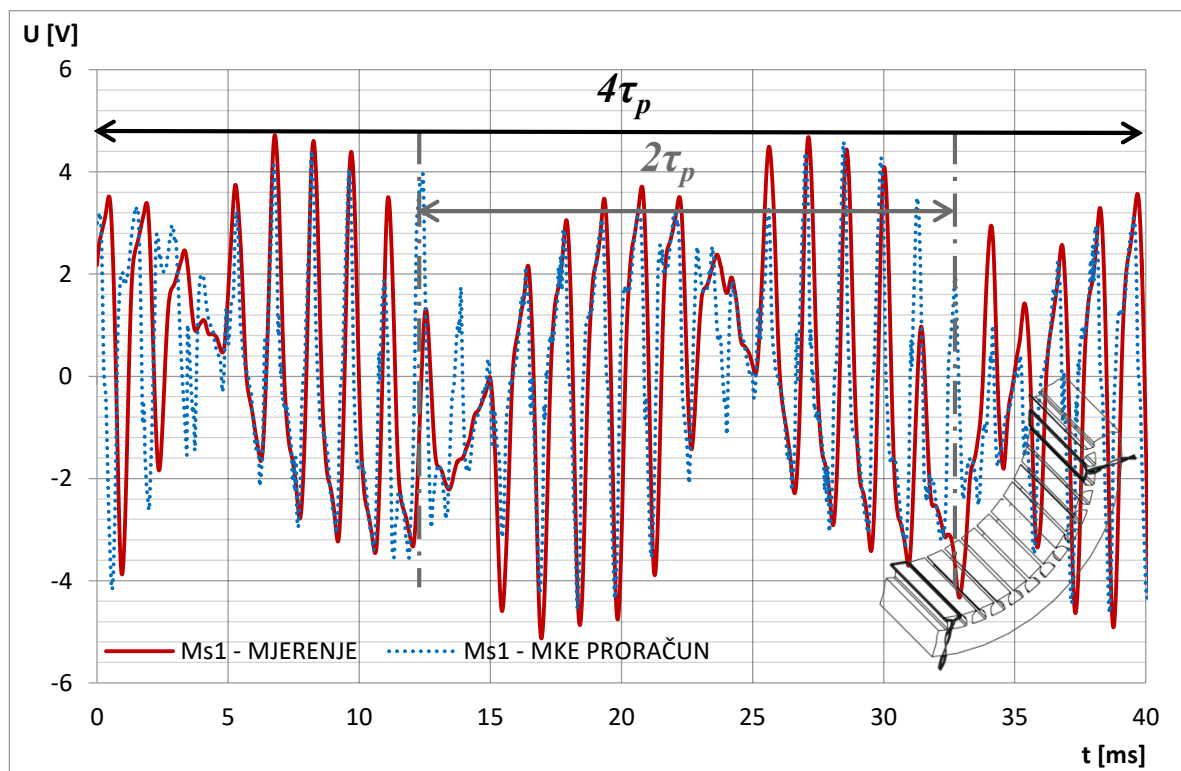
Slika 7.3 Usporedba napona induciranih u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida dva štapa rotora



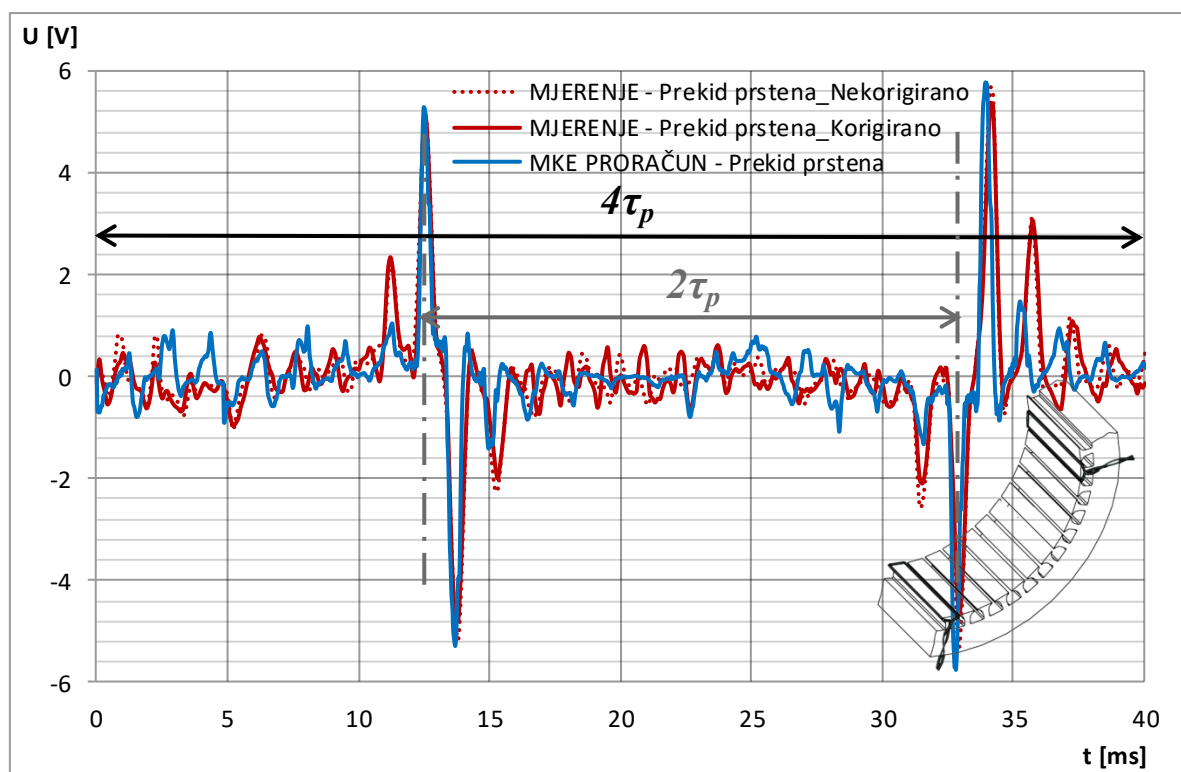
Slika 7.4 Usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida dva štapa rotora

### 7.3 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod prekida prstena kaveza rotora

Analizirana je usporedba rezultata MKE proračuna i mjerenja za kvar rotora i to prekid prstena kaveznog namota. Slika 7.5 prikazuje usporedbu napona induciranih u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem na motoru u laboratoriju. Iz usporedbe valnih oblika može se vidjeti da je postignuto dobro slaganje rezultata proračuna i mjerenja po valnom obliku, dok postoji odstupanje u veličini induciranih napona. Na slici 7.6 prikazana je usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida prstena rotora. Na istoj slici prikazna je i razlika induciranih napona dobivena mjerenjem, a koja je također korigirana izmjerenom razlikom napona dobivenom u ispravnom stanju (valni oblik prikazan isprekidanom crvenom linijom). Ta korekcija je provedena iz istog razloga kao i u prethodna dva analizirana slučaja s ciljem dobivanja točnijih rezultata. Analizom valnih oblika utvrđeno je dobro slaganje rezultata mjerenja i proračuna po valnom obliku (osobito na dijelu valnog oblika gdje porasti napona upućuju na pojavu kvara), s time da ipak postoji odstupanje u veličini napona koje za ovaj analizirani slučaj iznosi 11 %. Dobiveno odstupanje odnosi se na iznos porasta napona (maksimalni vrh napona) koji u razlici napona dvaju svitaka upućuje na pojavu prekida prstena.



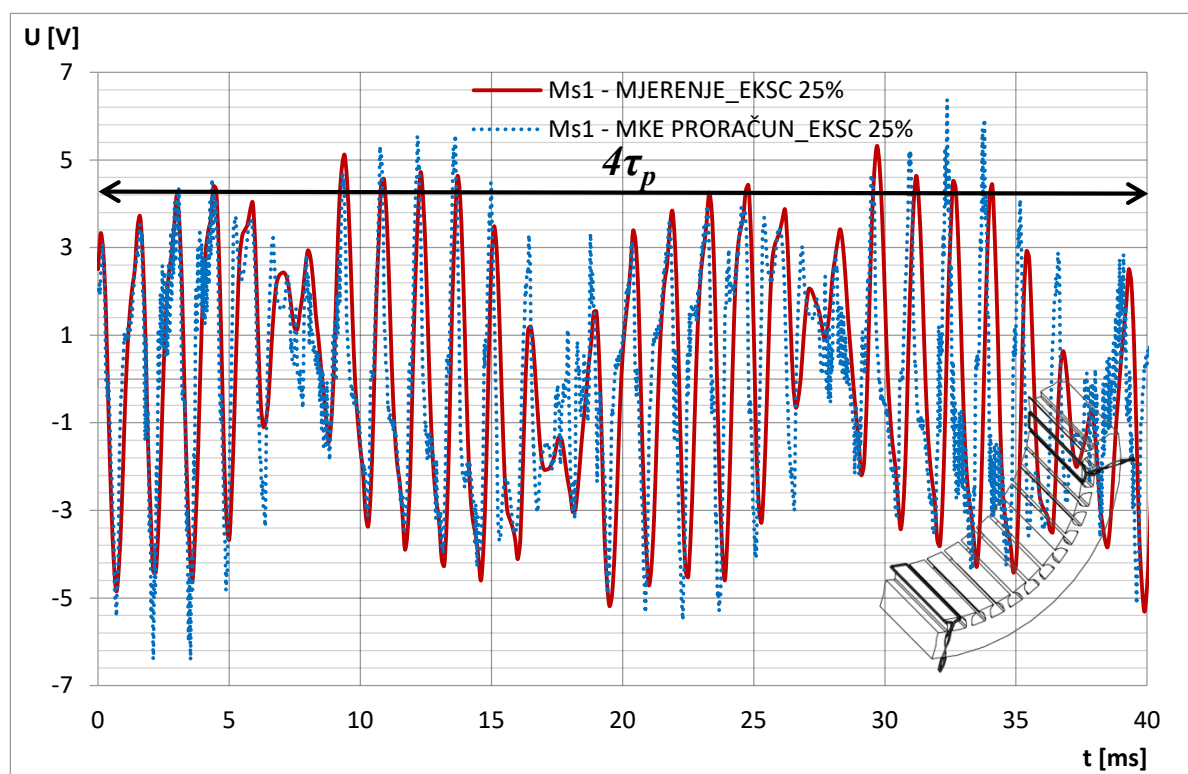
Slika 7.5 Usporedba napona induciranog u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida prstena rotora



Slika 7.6 Usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida prstena rotora

#### 7.4 Usporedba induciranih napona dobivenih MKE proračunom i mjerenjem kod statičkog ekscentriciteta iznosa 25 %

Analizirana je usporedba rezultata MKE proračuna i mjerenja za kvar rotora i to pojava statičkog ekscentriciteta u iznosu od 25 % zračnog raspora. Slika 7.7 prikazuje usporedbu napona induciranih u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem na motoru u laboratoriju. Iz usporedbe valnih oblika, može se vidjeti da je postignuto dobro slaganje rezultata proračuna i mjerenja po valnom obliku dok postoji odstupanje u veličini induciranih napona. Analizom valnih oblika može se potvrditi dobro slaganje rezultata mjerenja i proračuna po valnom obliku, dok ponovno postoji odstupanje u veličini napona koje u ovom slučaju iznosi 20 % (postotno odstupanje u amplitudi između vrijednosti induciranih napona mjerene i izračunate veličine).



Slika 7.7 Usporedba napona induciranih u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod statičkog ekscentriciteta iznosa 25 %

Dakle, iz usporedbe induciranih napona u mjernim svicima dobivenim MKE proračunima i mjerenjima jasno se vidi da postoji dobro slaganje po valnom obliku napona. Time je dokazano da je MKE proračunima moguće vrlo dobro opisati ponašanje bilo kojega asinkronog motora na kojem je prisutan neki od analiziranih kvarova. To je posebno važno jer je u sklopu disertacije

cjelokupna analiza izvršena na četveropolnom stroju. Stoga je moguće zaključiti da je za asinkrone motore nekoga drugog polariteta dovoljno provesti MKE analizu i na taj način odrediti potreban minimalni broj parova mjernih svitaka.

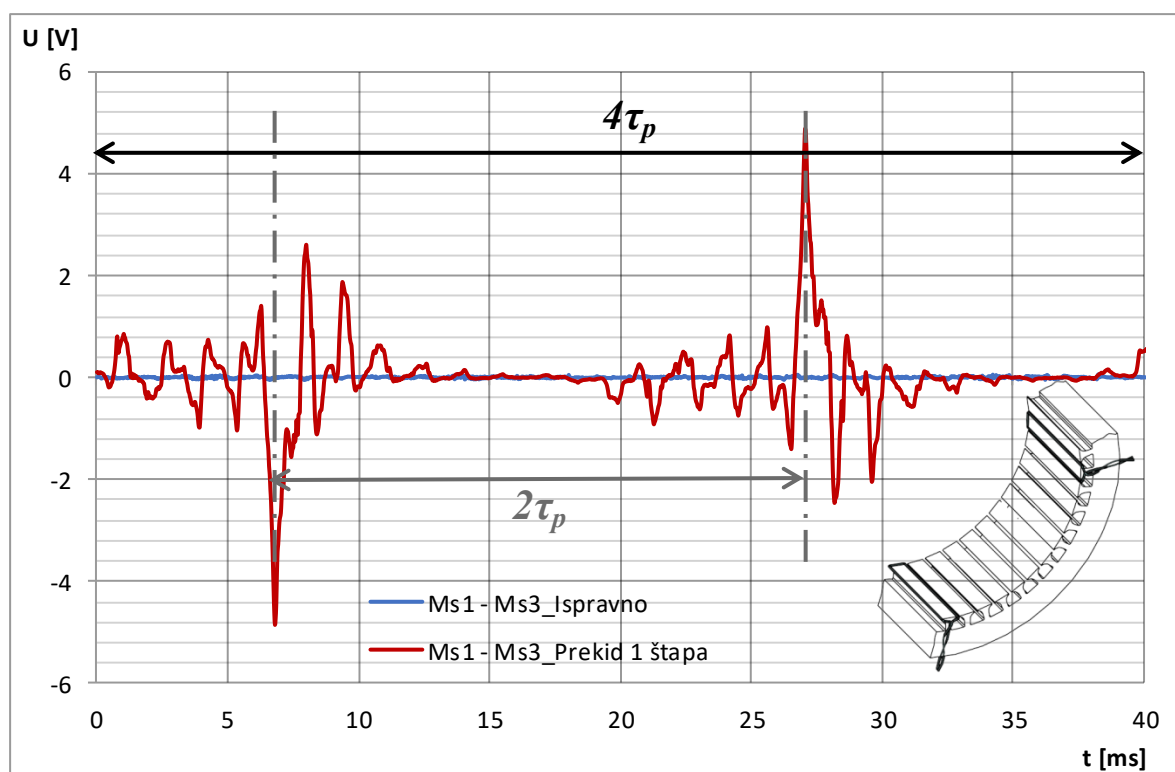
Odstupanja koja su dobivena za svaki analizirani kvar između rezultata proračuna i mjerenja posljedica su nesavršenosti ugradnje, tolerancije u izradi strojeva i nesavršenosti mjernog postupka. Utjecaj ovih parametara na točnost mjerenja može se obuhvatiti i odrediti u sklopu izračuna mjerne nesigurnosti. Za ova eksperimentalna mjerenja određena je mjerna nesigurnost cjelokupnog mjernog postupka (i to za 95 % točnosti izračuna) koja iznosi  $\pm 17,74$  %. Odstupanja rezultata proračuna i mjerenja analiziranih kvarova nalaze se unutar područja koje je pokriveno mjernom nesigurnošću.

## **8. Algoritam za prepoznavanje pojedinih vrsta kvarova temeljem induciranih napona u mjernim svicima**

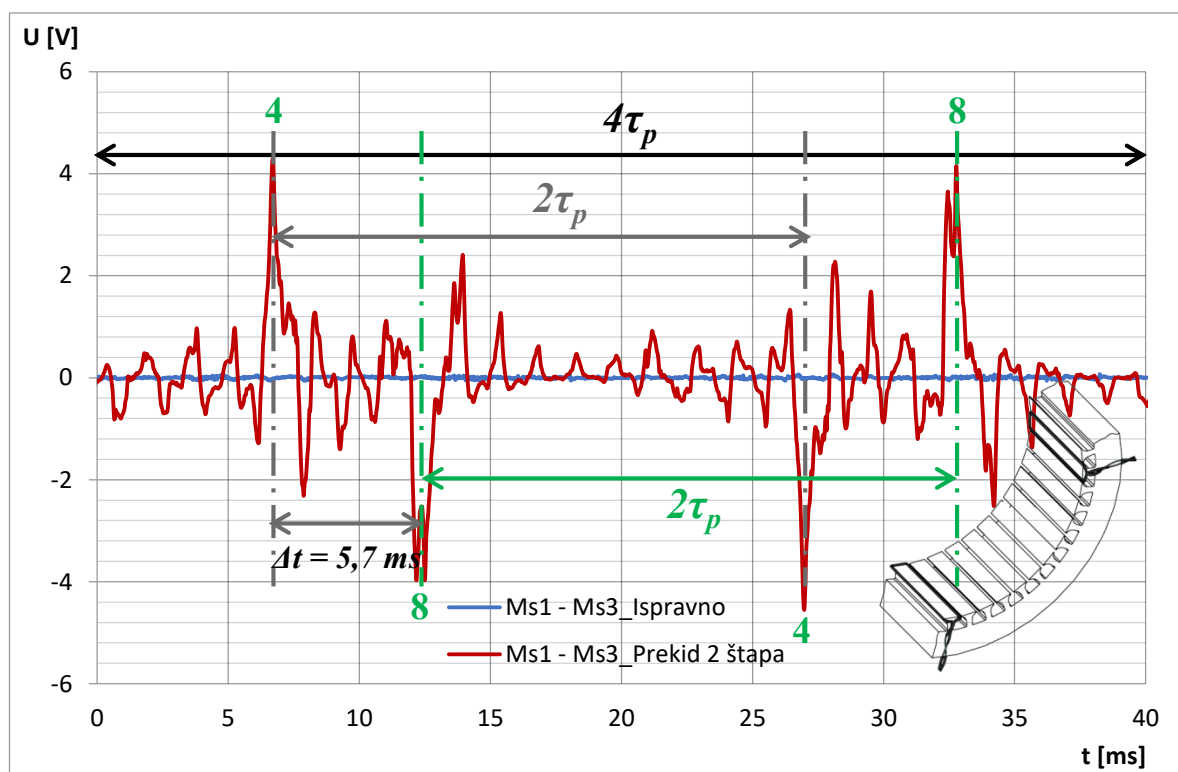
U ovom poglavlju opisani su algoritam i metoda raspoznavanja kvarova rotora temeljem induciranih napona u mjernim svicima. Korištenjem rezultata dobivenih MKE proračunom i mjerenjima na asinkronom motoru uveden je algoritam za otkrivanje i prepoznavanje kvarova. U prijašnjim poglavljima prikazani su rezultati koji se odnose na pouzdano i točno otkrivanje kvarova kaveznog rotora asinkronog motora. Analizirana je pojedina vrsta kvara i mogućnosti njegove detekcije na osnovi induciranih napona u mjernim svicima koji su ugrađeni u zračni raspored motora, a posljedica su okretnoga magnetskog polja rotora, tj. elektromagnetske indukcije. Pokazano je da je matematički model (MKE model) dovoljno točan te je moguće njime utvrditi koja vrsta kvara izaziva izmjerenu pojavu. Na osnovi dobivenih rezultata moguće je otkriti kvarove rotora, međutim postavlja se pitanje je li moguće međusobno razlikovati i prepoznati pojedini kvar. Rezultatima proračuna i mjerenja potvrđena je iznesena teza. Pokazano je da svaki kvar ima vlastitu prirodu ponašanja koja se očituje u induciranom naponu mjernih svitaka koji su međusobno razmaknuti za polni korak motora. Prije objašnjenja algoritma, prikazane su još jednom izvedene svojstvene karakteristike svakog analiziranog kvara. Te karakteristike su bile temelj za razvoj algoritma za prepoznavanje kvarova rotora (bilo prekida kaveznog namota bilo pojave statičkog ekscentriciteta).

### **8.1 Svojstvene karakteristike kvara rotora motora**

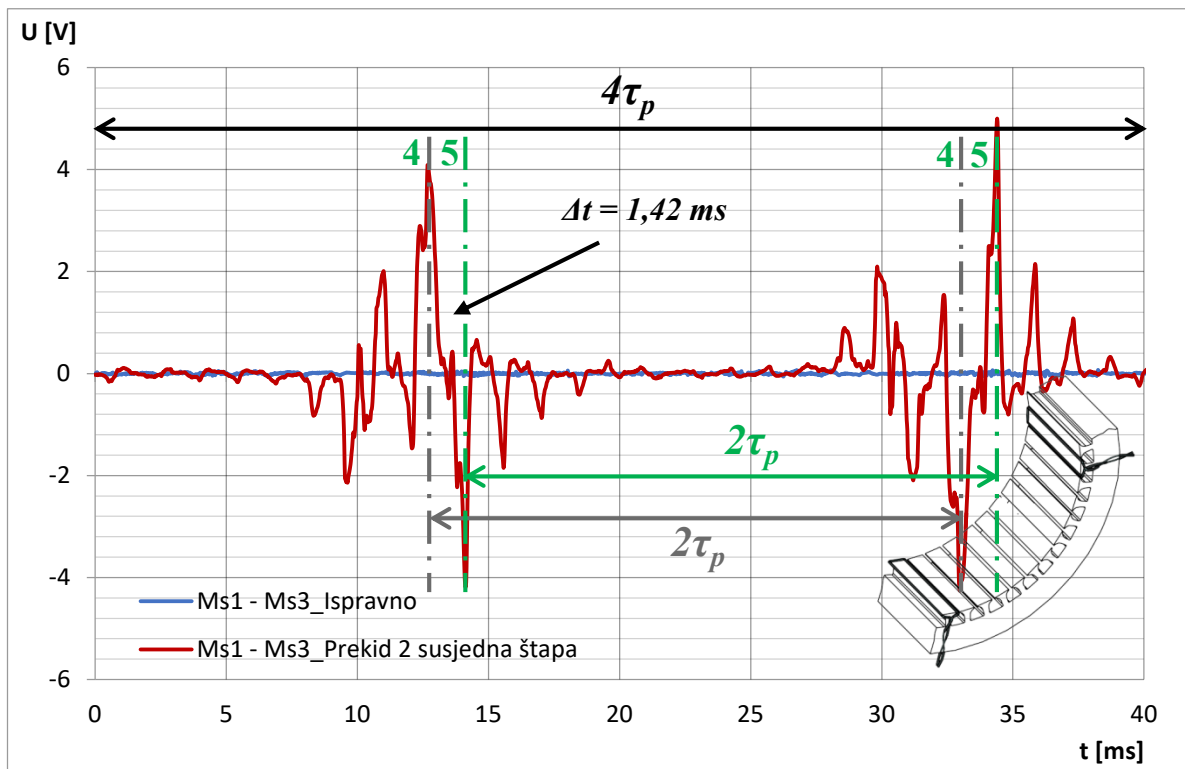
Prvi analizirani kvar je bio prekid jednog štapa rotora. Za taj kvar je svojstveno da, ukoliko se primijeni metoda oduzimanja napona induciranog u mjernim svicima međusobno razmaknutima za polni korak, će se u naponu koji je dobiven oduzimanjem pojaviti karakteristični porasti napona. Ti porasti napona prikazani su na slici 8.1 i mogu se koristiti u analizi stanja kaveznog rotora s ciljem točnog otkrivanja kvara. Osim prekida jednog štapa rotora, također je analiziran slučaj prekida dva štapa te prekid dva susjedna štapa. Također je i za ova dva analizirana slučaja svojstveno da, ukoliko se primijeni metoda oduzimanja napona induciranog u mjernim svicima međusobno razmaknutima za polni korak, će se valnom obliku razlike pojaviti karakteristični porasti napona. Ti porasti napona prikazani su na slici 8.2 (prekid dva štapa) i 8.3 (prekid dva susjedna štapa). Također se na slikama 8.2 i 8.3 može vidjeti da su u valnom obliku razlike napona prisutna po četiri izrazita porasta napona koja upućuju na prekid više štapova rotora. Stoga se ti porasti, mogu koristiti u analizi stanja kaveza rotora i za određivanje broja prekinutih štapova.



Slika 8.1 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida jednog štapa rotora

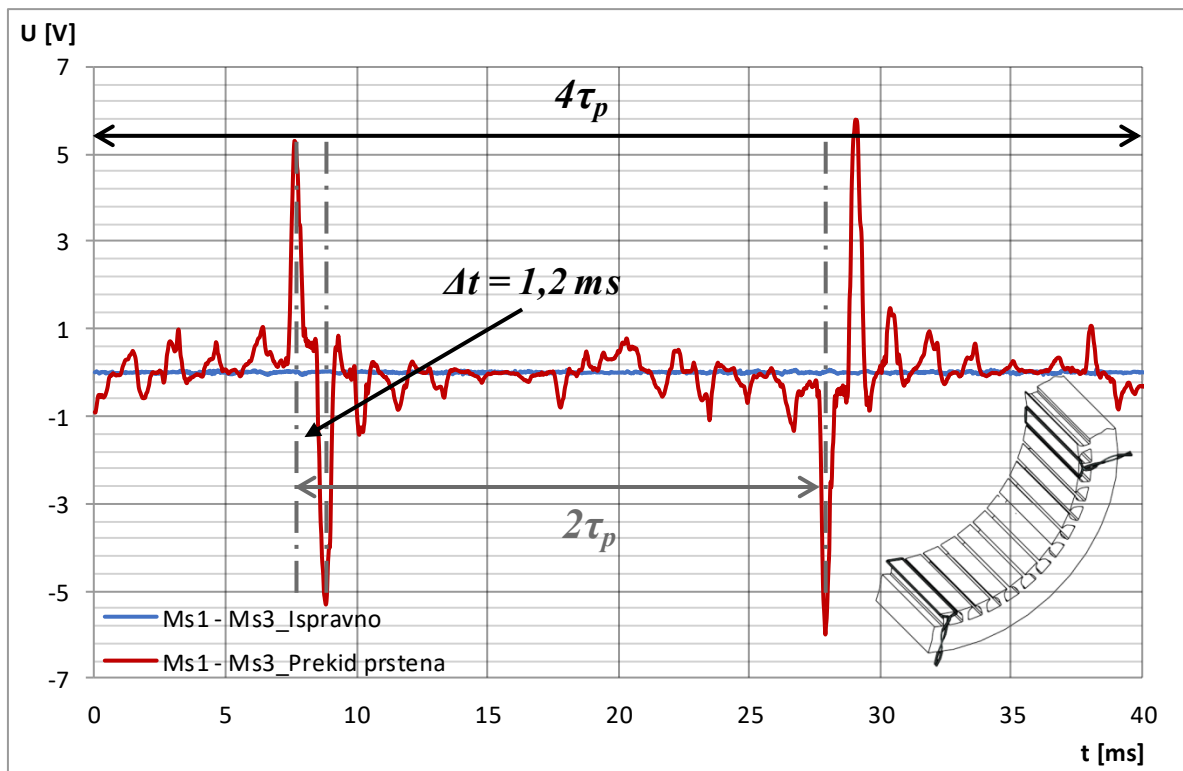


Slika 8.2 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida dva štapa rotora



Slika 8.3 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida dva susjedna štapa rotora

Sljedeći analizirani kvar bio je prekid prstena kaveznog rotora. Za taj kvar je svojstveno da ukoliko se primijeni metoda oduzimanja napona induciranog u mjernim svicima međusobno razmaknutima za polni korak, u naponu koji je dobiven oduzimanjem pojaviti će se karakteristični porasti napona. Ti porasti napona prikazani su na slici 8.4 i mogu se koristiti u analizi stanja kaveznog rotora s ciljem točnog otkrivanja kvara. Ukoliko se uspoređi valni oblik sa slike 8.1 s valnim oblikom sa slike 8.4, može se vidjeti da kod prekida prstena postoje četiri izrazita karakteristična porasta napona u odnosu na dva koja se javljaju u slučaju prekida jednog štapa. Temeljem svojstvenih valnih oblika moguće je međusobno raspoznati ova dva kvara. Međutim, u slučaju prekida dva štapa situacija se komplicira, pogotovo u slučaju kada su prekinuta dva susjedna štapa. Ukoliko se usporede valni oblici napona sa slike 8.2 i 8.3 s valnim oblikom sa slike 8.4, može se vidjeti da su u sva tri slučaja u svojstvenim valnim oblicima prisutna po četiri karakteristična porasta napona. Svojstvene valne oblike stoga je potrebno detaljnije obraditi i analizirati. Pod daljnom analizom podrazumijeva se određivanje vremenskog razmaka pri pojavljivanju karakterističnih porasta za slučaj prekida dva štapa, a potom i prekida prstena.

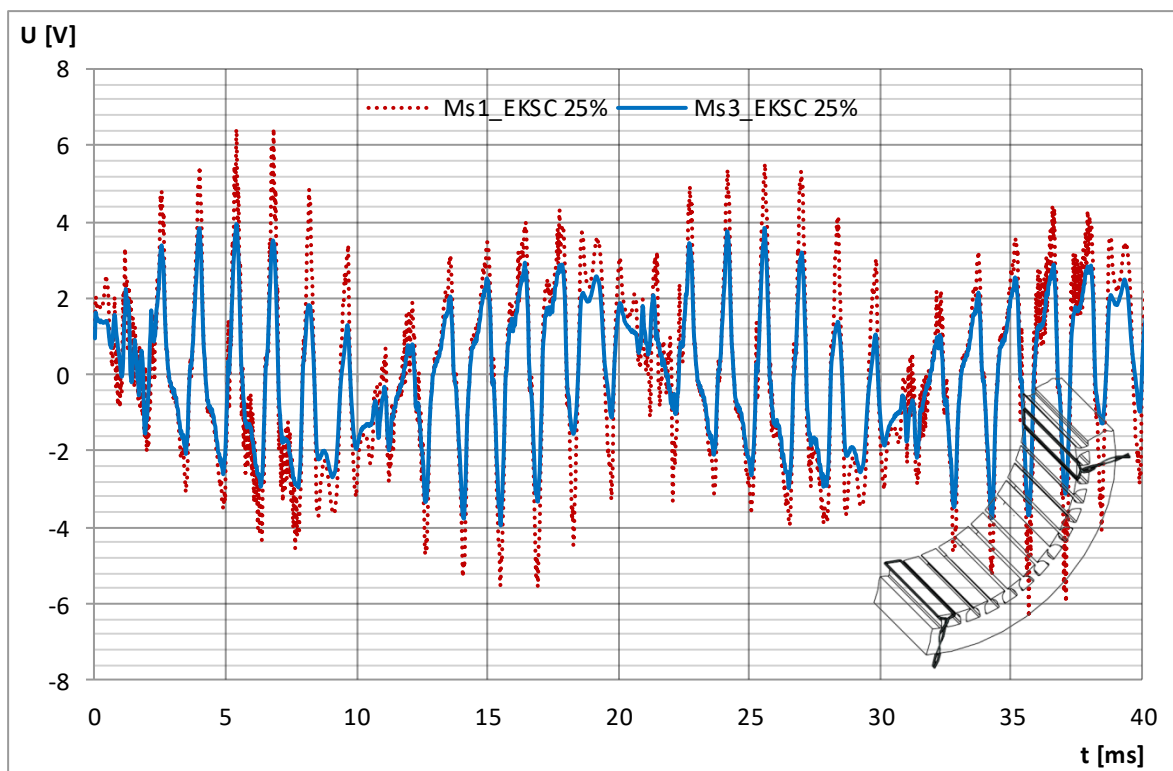


Slika 8.4 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida prstena kaveznog rotora

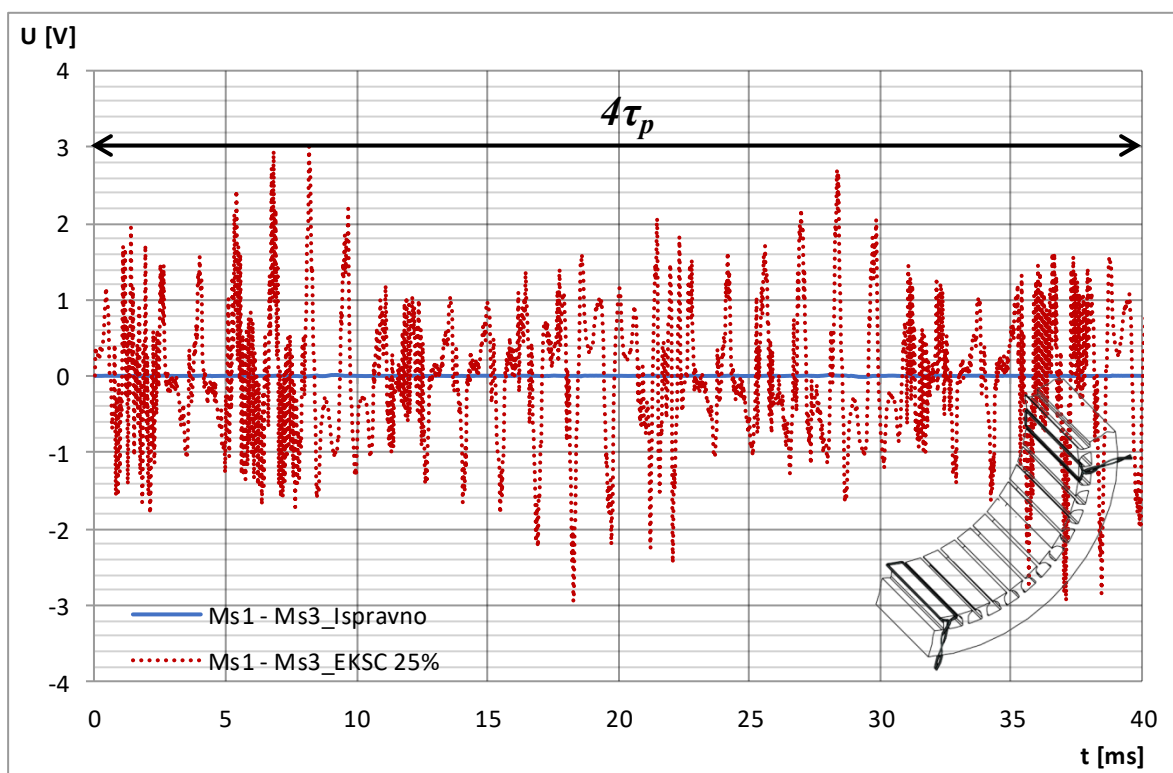
Analizirani četveropolni motor na rotoru ukupno ima  $nr = 28$  štapova, a vrijeme potrebno za jedan okret rotora iznosi  $t_{period} = 40 \text{ ms}$ . Temeljem toga moguće je odrediti vremensko pojavljivanje svakog štapa rotora u induciranom naponu u mjernom svitku. Na slici 5.7 u poglavlju 5 je prikazano kako se prolazak pojedinog štapa rotora očituje u valnom obliku induciranog napona mjernog svitka. Na osnovu broja štapova i vremena jednog okreta rotora, određeno je da vremenski interval između pojavljivanja dvaju štapova iznosi  $1,42 \text{ ms}$  ( $t_{period}/nr = 40\text{ms}/28 = 1,42 \text{ ms}$ ). Ako se određuje vremenski razmak između pojavljivanja dvaju karakterističnih porasta napona sa slike 8.2, može se utvrditi da on za analizirani slučaj iznosi  $5,7 \text{ ms}$ . Budući da je ovaj interval višekratnik vremenskog intervala  $1,42 \text{ ms}$  može se utvrditi da su ova dva porasta posljedica prekida dvaju štapova. Sljedeća dva porasta se događaju za točno  $2\tau_p$  (primjenjena je metoda oduzimanja napona za mjerne svitke udaljene za dvostruki polni korak) i ponovno su ta dva porasta napona međusobno udaljena jedan od drugog za vremenski interval  $5,7 \text{ ms}$ . Prilog da je riječ o višekratniku je i taj što ukoliko se vremenski interval  $5,7 \text{ ms}$  podijeli s brojem 4 (za upravo toliko su međusobno prostorno udaljeni jedan od drugog prekinuti štapovi rotora) dobiva se interval  $1,42 \text{ ms}$ . Za analizirani slučaj prekida dva susjedna štapa, ako se promotre dva bliska porasta napona sa slike 8.3, može se utvrditi da su ona međusobno udaljena za vremenski interval  $1,42 \text{ ms}$ . Budući da to točno odgovara vremenskom pojavljivanju svakog

pojedinih štapova rotora u jednom okretu stroja, može se potvrditi da ovaj svojstveni valni oblik razlike napona odgovara prekidu dvaju štapova i to onih susjednih. Sljedeća dva bliska porasta se pojavljuju ponovno za  $2\tau_p$  i ponovno su međusobno udaljena jedan od drugog za vremenski interval 1,42 ms. Kod valnog oblika prikazanog na slici 8.4, dva bliska porasta napona međusobno su udaljena za vremenski interval koji iznosi 1,2 ms. Taj interval je određen obradom signala, na način da je sa slike 8.4 utvrđeno da se prvi ekstremni porast napona pojavljuje u trenutku  $t_{1pr} = 7,625$  ms, a drugi u trenutku  $t_{2pr} = 8,825$  ms. Međusobnim oduzimanjem tih dvaju trenutaka određen je interval od 1,2 ms ( $\Delta t_{pr} = t_{2pr} - t_{1pr} = 8,825 \text{ ms} - 7,625 \text{ ms} = 1,2 \text{ ms}$ ). Budući da se taj interval ne može dovesti u jasnu korelaciju s brojem štapova i strogo je manji od intervala između pojavljivanja dva susjedna štapa, ovakav svojstveni oblik moguće je pripisati jedino prekidu prstena. Sljedeća dva bliska porasta ponovno se pojavljuju točno za  $2\tau_p$  i međusobno su udaljena za interval 1,2 ms (vremensko pojavljivanje ekstremnih porasta sada iznosi  $t_{3pr} = 27,9$  ms i  $t_{4pr} = 29,1$  ms). Za analizirane slučajeve prekida više štapova i prekida prstena na slikama 8.2, 8.3 i 8.4 naznačeni su vremenski intervali pojavljivanja pojedinih porasta napona. Temeljem iznesenog može se zaključiti da se na osnovu svojstvenih karakteristika i međusobnog vremenskog razmaka pri pojavljivanju karakterističnih ekstremnih porasta napona, mogu međusobno raspoznati prekid jednog i više štapova rotora od prekida prstena rotora. Upravo ove izvedene značajke analiziranih kvarova su omogućile izradu algoritma koji međusobno pouzdano raspoznaje ove dvije vrste kvarova rotora.

Osim oštećenja kaveza rotora, kvar koji je još analiziran je statički ekscentricitet rotora. Za taj kvar je svojstveno da, ukoliko se prati efektivna vrijednost induciranih napona u svakom pojedinom mjernom svitku, tada će se pojava statičkog ekscentriciteta očitovati u povećanom iznosu induciranih napona za određeni postotak (ovisno o iznosu ekscentriciteta) i to u svitku koji se nalazi najbliže rotoru. Na slici 8.5 prikazano je povećanje napona induciranih u mjernom svitku Ms1 u odnosu na mjerni svitak Ms3 koji je prostorno razmaknut za  $2\tau_p$ . Ukoliko se primijeni metoda oduzimanja napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms3, tada se u valnom obliku dobivenom oduzimanjem dobiva oblik koji je svojstven samo za statički ekscentricitet. Taj valni oblik prikazan je na slici 8.6. U usporedbi s valnim oblicima dobivenim za prekid jednog i više štapova te za prekid prstena, može se jasno vidjeti na slici 8.6 da i ovaj kvar ima svojstveni oblik koji je različit od svojstvenoga valnog oblika prikazanog na slikama 8.1, 8.2, 8.3 i 8.4. Također, važno je istaknuti da pojava statičkog ekscentriciteta narušava simetričnost induciranih napona u mjernim svicima razmaknutim za polni korak. Stoga, je upravo ta promjena induciranih napona glavna značajka koja je korištena u algoritmu za prepoznavanje ovog kvara rotora.



Slika 8.5 Svojstvena karakteristika povećanja induciranih napona u jednom od mjernih svitaka kod pojave statičkog ekscentriciteta od 25% zračnog raspora



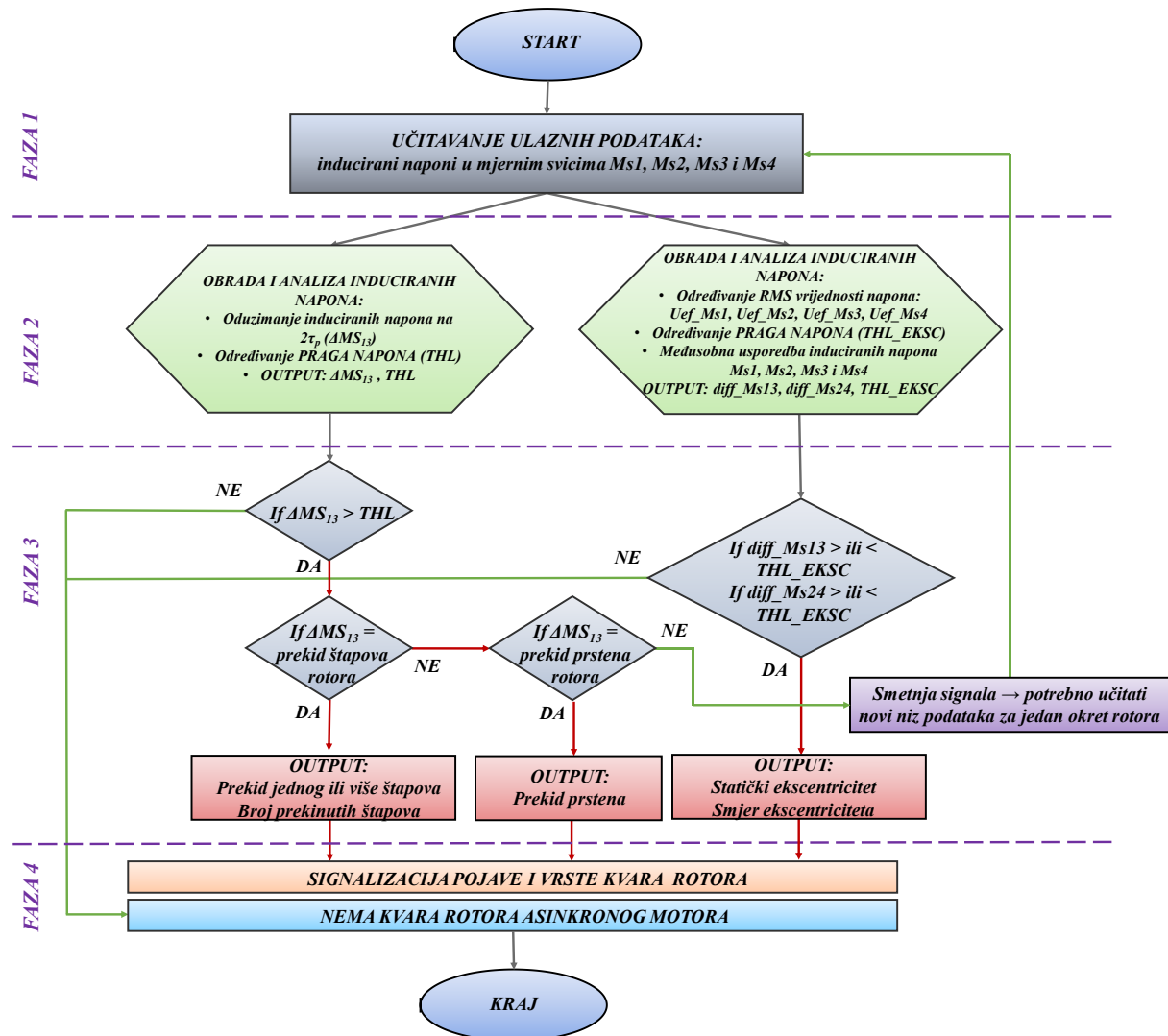
Slika 8.6 Svojstveni valni oblik razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za  $2\tau_p$  u ispravnom stanju i za iznos statičkog ekscentriciteta od 25%

Dakle, da bi se mogla identificirati točna vrsta kvara rotora kaveznoga asinkronog motora potrebno je ugraditi najmanje četiri mjerna svitka na zub statora koji su međusobno pomaknuti za polni korak,  $\tau_p$ . Budući da je moguće temeljem induciranih napona u tim mjernim svicima i u kombinaciji s primjenom metode oduzimanja induciranih napona, odrediti svojstvene karakteristike, moguće je i izraditi odgovarajući algoritam za prepoznavanje svakog pojedinog kvara rotora kaveznog namota.

## **8.2 Algoritam za otkrivanje kvara rotora motora**

U ovom potpoglavlju objašnjen je algoritam za otkrivanje i prepoznavanje kvarova rotora asinkronog motora čiji dijagram toka je prikazan na slici 8.7. Na temelju prethodno prikazanih rezultata (i proračuna i mjerenja) jasno je da algoritam mora kao ulazne parametre koristiti inducirane napone u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 dobivene za jedan puni okret rotora motora. Dijagram algoritma sa slike 8.7 može se podijeliti u četiri faze koje sadrže sljedeće:

- **Faza 1:** Inicijalizacija varijabli i učitavanje ulaznih podataka – vrijednost induciranih napona u četiri mjerna svitka deklarirana oznakama Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 (naponski valni oblici poput onih prikazanih na slici 5.6) međusobno razmaknuti za  $\tau_p$  i to za jedan puni okret rotora;
- **Faza 2:** Faza obrade i analize podataka – oduzimanje valnih oblika induciranih napona, određivanje efektivne vrijednosti za učitane inducirane napone mjernih svitaka, utvrđivanje granične vrijednosti napona, odnosno praga napona na temelju učitanih podataka (prag napona se određuje iz razlike napona induciranih u dvama mjernim svicima pri ispravnom stanju motora).
- **Faza 3:** Faza odlučivanja – faza koja sadrži uvjete istinitosti i usporedbe s pragom napona za otkrivanje i prepoznavanje vrste kvara rotora kaveznog motora; grana algoritma za prekid kaveza provjerava da li je razlika napona po valnom obliku svojstvena obliku koji odgovara prekidu štapa ili prekidu prstena; grana algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta provjerava postoji li međusobno odstupanje između efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima razmaknutim za  $\tau_p$  i da li to odstupanje prelazi dopuštene vrijednosti.
- **Faza 4:** Faza signalizacije – faza koja na osnovu izlaznih parametara iz faze 3 donosi odluku o signalizaciji ispravnog ili kvarnog stanja te obavještava korisnika o vrsti kvara koji se je dogodio na rotoru.



Slika 8.7 Dijagram toka algoritma za prepoznavanje kvara rotora asinkronog motora

Dakle, iz dijagrama toka na slici 8.7 može se vidjeti da su za analizirane kvarove razrađene dvije grane algoritma. Jedna grana algoritma se primjenjuje za otkrivanje i međusobno raspoznavanje prekida jednog ili više štapova rotora te prstena rotora, dok se druga primjenjuje za otkrivanje statičkog ekscentriciteta. U nastavku je opisan sam algoritam, čiji su kôdovi i grafički prikaz rezultata prikazani unutar programskog okruženja programa *Octave* [98].

### 8.2.1 Algoritam za otkrivanje prekida štapova i prstena rotora

Na temelju rezultata proračuna i mjerenja razvijen je algoritam za otkrivanje prekida jednog i više štapova te prstena kaveznog rotora. Kôd algoritma za otkrivanje prekida kaveznog namota dan je u Prilogu A. Na osnovi učitanih vrijednosti iz faze 1 za otkrivanje prekida kaveza dovoljno je u daljnjoj obradi podataka koristiti naponske vrijednosti dvaju mjernih

svitaka. U ovom analiziranom slučaju odabrani su inducirani naponi u mjernim svicima Ms1 i Ms3 koji su međusobno razmaknuti za dvostruki polni korak. Kako bi algoritam bio funkcionalan i pouzdano otkrio prekid kaveza potrebno je odrediti prag napona odnosno graničnu vrijednost praga napona. Prag napona je vrijednost koja služi kako bi algoritam na temelju dobivene razlike napona dvaju svitaka eliminirao sve one poraste napona koji nisu direktna posljedica prekida štapova ili prekida prstena odnosno oštećenja kaveznog namota. Određivanje praga napona bez korištenja rezultata MKE proračuna i mjerenja nikako ne bi bio jednostavan zadatak. Međutim temeljem tih saznanja i rezultata omogućena je izrada funkcije koja na osnovi učitano valnog oblika razlike napona automatski određuje karakteristične ekstremne poraste napona i prag napona. Kôd funkcije koja određuje vrhove i prag napona nalazi se u Prilogu B. Složenost određivanja pouzdanog praga napona za detekciju kvara namota rotora očituje se ukoliko se detaljno promotre svojstvene karakteristike (valni oblici razlike napona) analiziranih kvarova prekida štapova i prstena (slike 8.1, 8.2, 8.3 i 8.4). Iz tih karakteristika koje se odnose na prekid kaveza rotora, može se vidjeti da u valnom obliku razlike napona postoji niz različitih manjih i većih porasta napona (vrhovi napona). Budući da su ti porasti veći od razlike napona koja se dobiva mjerenjem u ispravnom stanju, jasno je da ukoliko bi prag bio temeljen samo na vrijednosti razlike napona koja je određena u ispravnom stanju, prilikom prekida štapa ili prstena došlo bi do prorade algoritma već i kod tih nižih porasta napona. Stoga, da bi se osigurala pouzdana detekcija, ali i osiguralo prepoznavanje vrste kvara izrađena je funkcija koja određuje vrhove napona i podešava vrijednost praga napona ovisno o učitano valnom obliku razlike napona i izraženim porastima napona. Time se onemogućava da algoritam detektira pogrešan kvar namota, pogrešan broj prekida štapova ili u najgorem slučaju da alarmira korisnika iako nije prisutan kvar.

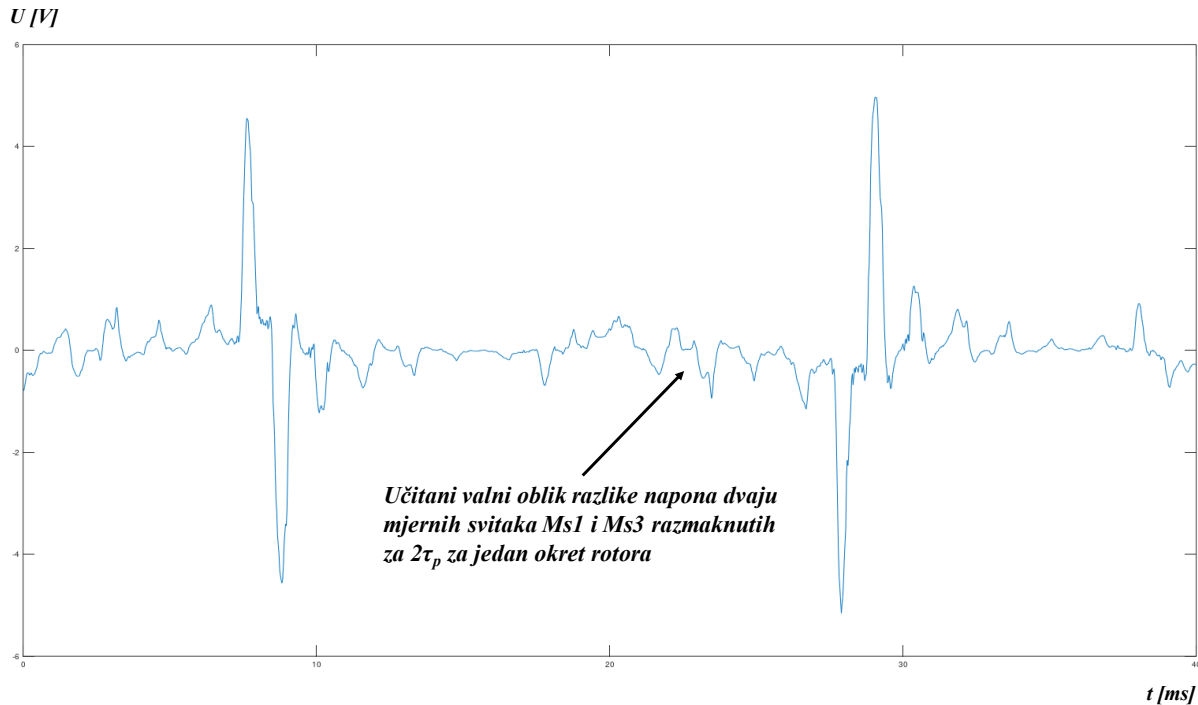
Funkcija za određivanje karakterističnih vrhova i praga napona (u kôdu algoritma nazvana *findpeaksandthreshold*) radi na način da prima tri obavezna argumenta:

- signal  $y$  – predstavlja razliku induciranih napona mjernih svitaka udaljenih za  $2\tau_p$ ,
- $nr$  – broj rotorskih štapova motora  $i$
- $dt$  – razmak svake točke u uzorkovanju signala

te jedan opcionalni argument koji služi algoritmu za određivanje granice praga napona i vrhova iznad te granice, a to je:

- varijabla  $dp$  – postotna razlika između impulsa napona koji su posljedica kvara od onih impulsa koji to nisu, u učitanoj signalu razlike napona.

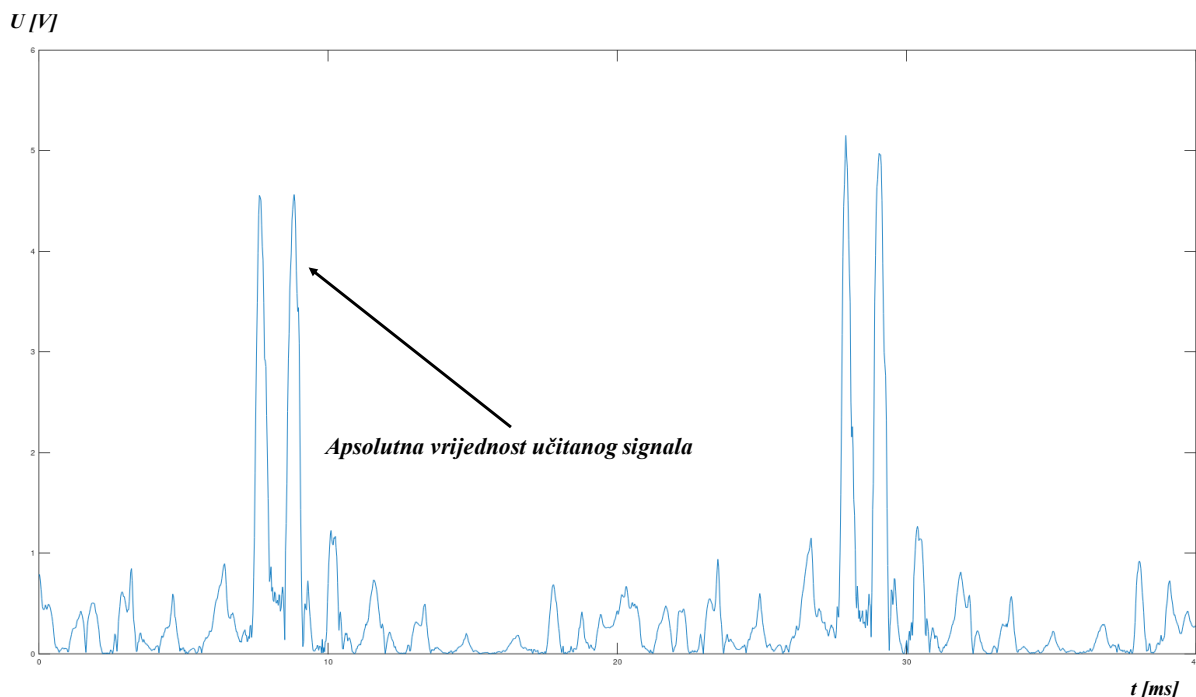
Kako bi se objasnio način na koji funkcija određuje vrhove i prag napona za učitani signal  $y$ , na jednom primjeru valnog oblika razlike napona detaljno je objašnjen princip rada funkcije. Slika 8.8 prikazuje primjer valnog oblika ulaznog signala, koji funkcija dalje obrađuje kako bi u tom signalu odredila vrhove napona i temeljem njega odredila iznos praga napona.



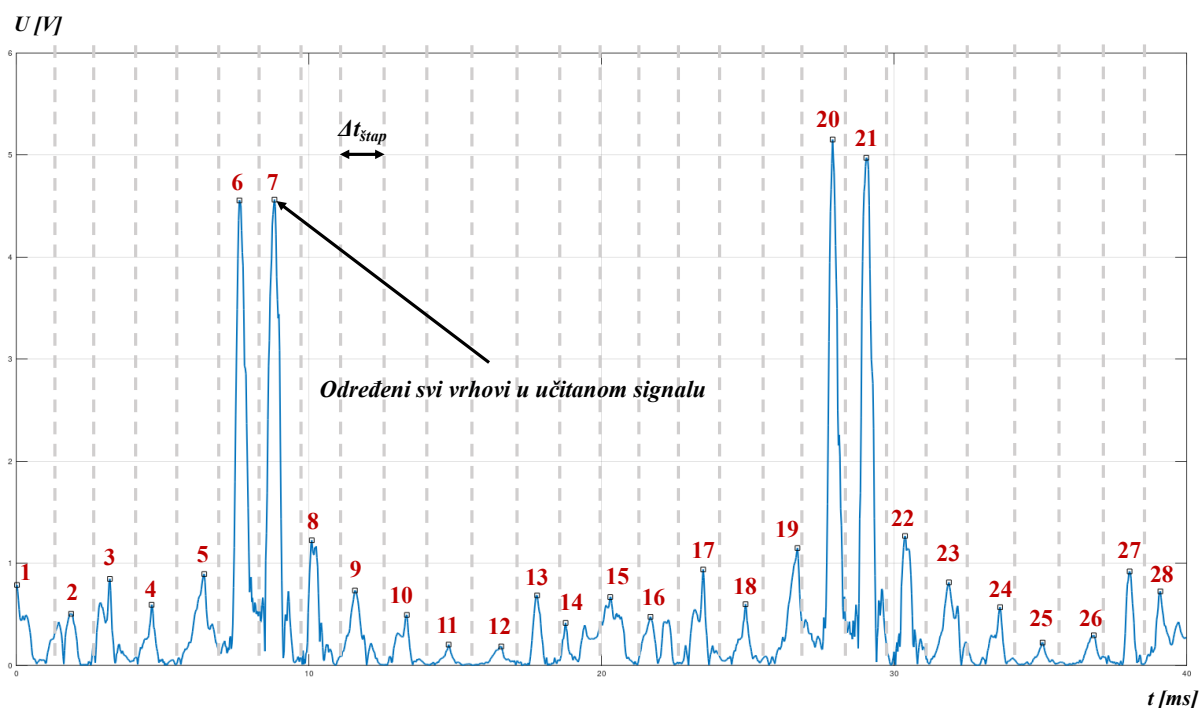
Slika 8.8 Primjer ulaznog signala  $y$  na temelju kojeg funkcija *findpeaksandthreshold* određuje prag i vrhove napona

Prvo što funkcija radi je to da u učitanoj signalu odredi sve vrhove napona. Vrhovi se određuju tako da se za svaku učitanoj točku signala uzima njegova apsolutna vrijednost. Stoga su sve vrijednosti signala pretvorene u apsolutne što je prikazano na slici 8.9. U signalu sa slike 8.9 funkcija određuje vrhove napona temeljem broja štapova ( $nr$ ) i broja učitanih točaka ( $dt$ ). Ono što funkcija radi je da učitani signal  $y$  podijeli u onoliko dijelova koliko motor ima štapova. Budući da se na osnovu učitanoj signala i varijable  $dt$  može odrediti koliki je ukupni broj učitanih točaka, dijeljenjem tog ukupnog broja s brojem štapova motora točno se određuje koliko točaka u signalu  $y$  reprezentira jedan štap. Funkcija sada unutar svakog tog dijela signala, odnosno spremnika koji reprezentira prolazak jednog štapa određuje pripadajući vrh napona. Podjela učitanoj signala  $y$  na spremnike podataka prikazana je na slici 8.10, gdje je širina spremnika koji reprezentira prolazak jednog štapa označena s  $\Delta t_{\text{štap}}$ . Algoritam funkcije utvrđuje da se radi o vrhu, ako su prethodna i sljedeća točka unutar tog spremnika podataka manje od trenutno gledane. Taj podatak se zapisuje kao vrh. Ukoliko postoji zapis vrha, a trenutno gledana točka je manja, takvu točku preskačemo. Ako naidemo

na vrh koji je veći od zapisanog, a nalazi se unutar istog promatranog spremnika podataka, mijenjamo zadnji zapisan vrh s tim vrhom. Kada se prođu sve učitane vrijednosti ovako podijeljenog signala, dobivamo informaciju o svim vrhovima unutar pojedinog spremnika podataka. Slika 8.10 prikazuje učitani signal  $y$  kojem su određeni svi vrhovi napona.



Slika 8.9 Ulazni signal  $y$  – sve učitane vrijednosti pretvorene u apsolutne



Slika 8.10 Učitani signal  $y$  – određeni svi vrhovi napona

U tablici 8.1 navedene su brojčane vrijednosti vrhova napona za odabrani primjer učitanoj signala razlike napona. Naznačeni redni broj sa slike 8.10 odgovara rednom broju u tablici 8.1 u kojoj su navedeni iznosi pojedinih vrhova napona.

Tablica 8.1 Vrijednost vrhova napona određenih unutar signala  $y$

|               |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Redni br.     | 1.      | 2.      | 3.      | 4.      | 5.      | 6.      | 7.      |
| $U_{vrh}$ [V] | 0,78774 | 0,50538 | 0,84719 | 0,59395 | 0,89472 | 4,55606 | 4,56418 |
| Redni br.     | 8.      | 9.      | 10.     | 11.     | 12.     | 13.     | 14.     |
| $U_{vrh}$ [V] | 1,22543 | 0,73402 | 0,49406 | 0,20324 | 0,18574 | 0,68568 | 0,41597 |
| Redni br.     | 15.     | 16.     | 17.     | 18.     | 19.     | 20.     | 21.     |
| $U_{vrh}$ [V] | 0,66938 | 0,47578 | 0,93962 | 0,59922 | 1,14979 | 5,15312 | 4,97400 |
| Redni br.     | 22.     | 23.     | 24.     | 25.     | 26.     | 27.     | 28.     |
| $U_{vrh}$ [V] | 1,2681  | 0,81335 | 0,57006 | 0,22373 | 0,29508 | 0,92069 | 0,72539 |

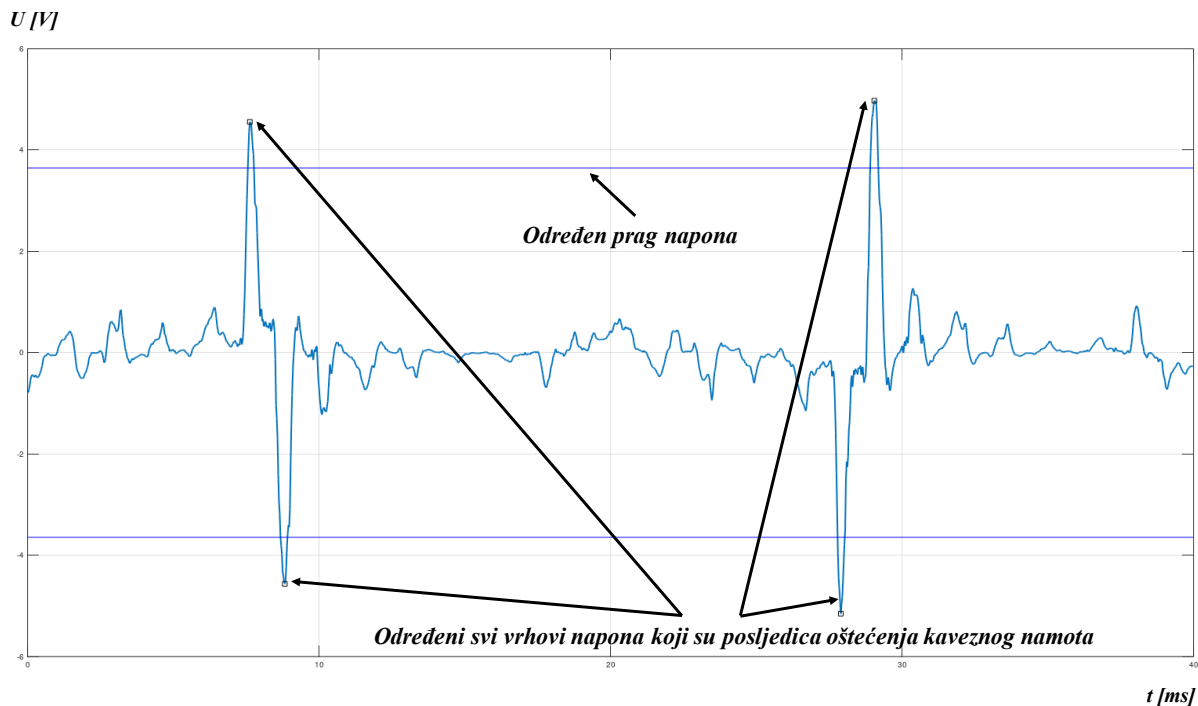
Ono što dalje algoritam funkcije radi je sortiranje vrhova napona od najvećeg prema najmanjem. Tako sortirani naponi po veličini prikazani su u tablici 8.2.

Tablica 8.2 Vrijednost vrhova napona unutar signala  $y$  – poredak od najvećeg prema najmanjem

|                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $U_{vrh, max1}$  | $U_{vrh, max2}$  | $U_{vrh, max3}$  | $U_{vrh, max4}$  | $U_{vrh, max5}$  | $U_{vrh, max6}$  | $U_{vrh, max7}$  |
| 5,15312          | 4,97400          | 4,56418          | 4,55606          | 1,2681           | 1,22543          | 1,14979          |
| $U_{vrh, max8}$  | $U_{vrh, max9}$  | $U_{vrh, max10}$ | $U_{vrh, max11}$ | $U_{vrh, max12}$ | $U_{vrh, max13}$ | $U_{vrh, max14}$ |
| 0,93962          | 0,92069          | 0,89472          | 0,84719          | 0,81335          | 0,78774          | 0,73402          |
| $U_{vrh, max15}$ | $U_{vrh, max16}$ | $U_{vrh, max17}$ | $U_{vrh, max18}$ | $U_{vrh, max19}$ | $U_{vrh, max20}$ | $U_{vrh, max21}$ |
| 0,72539          | 0,68568          | 0,66938          | 0,59922          | 0,59395          | 0,57006          | 0,50538          |
| $U_{vrh, max22}$ | $U_{vrh, max23}$ | $U_{vrh, max24}$ | $U_{vrh, max25}$ | $U_{vrh, max26}$ | $U_{vrh, max27}$ | $U_{vrh, max28}$ |
| 0,49406          | 0,47578          | 0,41597          | 0,29508          | 0,22373          | 0,20324          | 0,18574          |

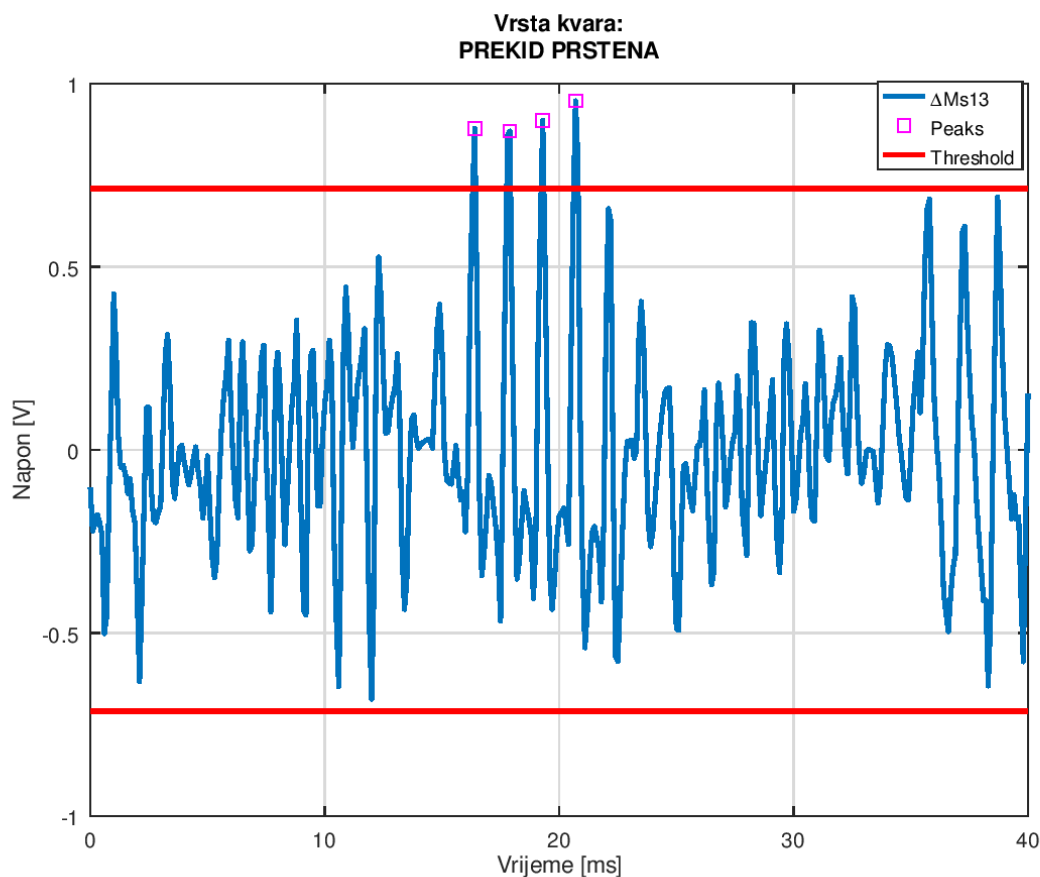
Nakon što su određeni i sortirani vrhovi napona, funkcija određuje granicu praga napona. Granica praga napona je potrebna kako bi se iz učitanoj signala  $y$  izdvojili ekstremni vrhovi

napona (koji su moguća posljedica oštećenja kaveza) od onih koji to nisu. Funkcija eliminira te poraste na način da uspoređuje koliko je međusobno postotno odstupanje između sortiranih vrhova. Funkcija pomoću varijable  $dp$  u tako formiranom nizu vrhova uspoređuje koliko iznosi razlika između prvog i drugog vrha, odnosno je li ta razlika veća od postavljene vrijednosti varijable  $dp$  (njeno određivanje je objašnjeno kasnije). Ukoliko nije tada zapisujemo taj vrh kao traženi ekstremni te funkcija dalje redom provjerava drugi i treći, potom treći i četvrti vrh te postupak ponavlja sve dok ne dođe do ona dva vrha čija je međusobna razlika veća od postavljene vrijednosti varijable  $dp$ . Kada dođe do posljednjeg ekstremnog vrha koji zadovoljava prethodno spomenuti uvjet, funkcija zapisuje taj vrh i završava s uspoređivanjem te informaciju o broju i vrijednostima određenih ekstremnih vrhova zapisuje u posebno polje. Na osnovu svojstvenih karakteristika utvrđeno je da u slučaju oštećenja kaveza (bilo prekida štapova bilo prstena), broj karakterističnih ekstremnih vrhova mora uvijek biti paran broj. Za slučaj da su funkcijom pronađeni ekstremni vrhovi (kao u odabranom primjeru učitanoj signalu  $y$ ), granica praga napona se određuje na način da se vrijednost zadnjeg određenog ekstremnog vrha umanji za postotnu vrijednost varijable  $dp$  (odnosno iznos maksimalnog napona zadnjeg ekstremnog vrha se pomnoži sa  $100\% - dp$ ). Ako funkcija nije pronašla niti odredila niti jedan ekstremni vrh u valnom obliku razlike napona (slučaj ispravnog stanja), granica se određuje tako da se u učitanoj signalu  $y$  odredi najveći vrh i njegova vrijednost se uveća za postotnu vrijednost varijable  $dp$  (odnosno najveći vrh se pomnoži sa  $100\% + dp$ ). Funkcija za određivanje vrhova i praga napona u algoritam za otkrivanje prekida štapova i prstena vraća kao argumente određenu granicu praga napona, broj ekstremnih vrhova i informaciju o njihovoj lokaciji u učitanoj signalu  $y$ . Na slici 8.11 je za učitani primjer signala razlike napona prikazana određena granica praga napona, određeni ekstremni vrhovi napona kao i njihove pozicije. Na temelju argumenata koje je funkcija vratila u algoritam za otkrivanje prekida kaveza rotora, algoritam određuje o kojoj vrsti prekida kaveza je riječ: prekid jednog štapa, prekid više štapova ili prekid prstena kaveznog namota. Za ispravan rad algoritma od iznimnog značaja je pravilno određivanje vrijednosti varijable  $dp$  unutar funkcije za određivanje vrha i praga napona. Kao što je spomenuto ranije varijabla  $dp$  predstavlja postotak razlike između vrhova (impulsa napona) kojom se određuje vrijednost granice praga napona. U nastavku je detaljnije objašnjen način ispravnog odabira vrijednosti varijable  $dp$ .



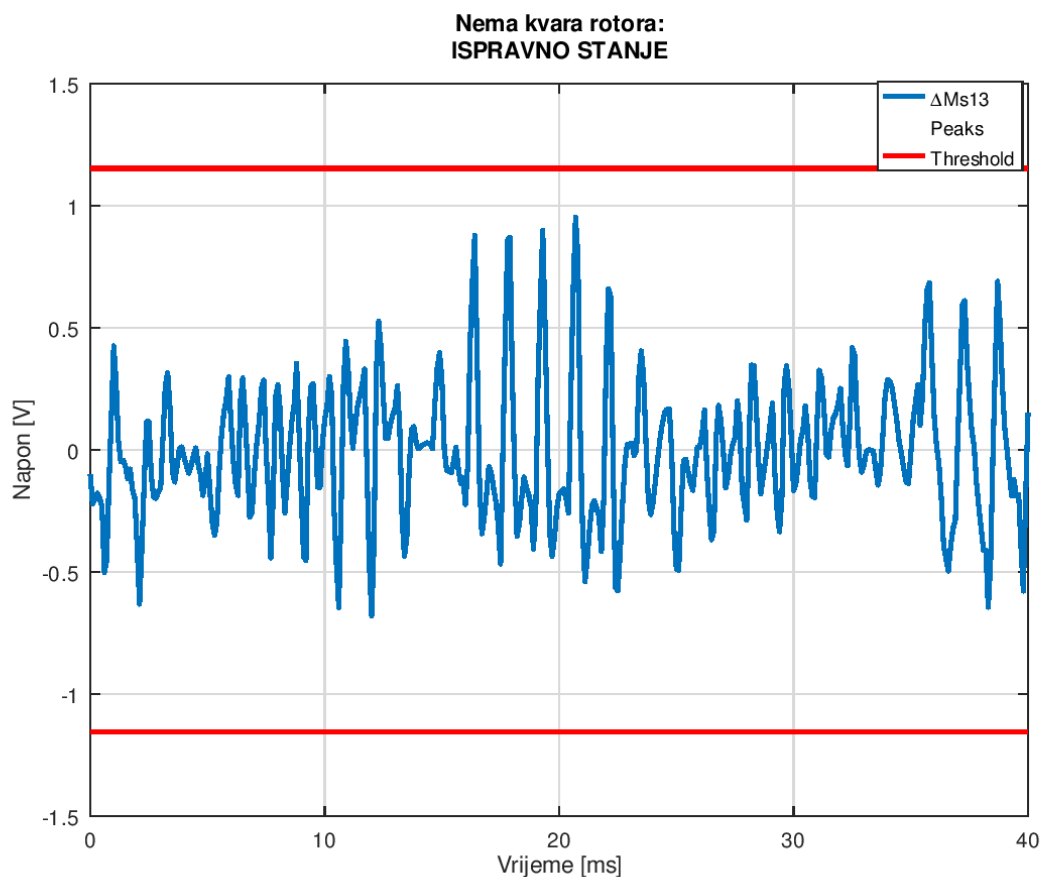
Slika 8.11 Učitani signal  $y$  – funkcijom *findpeakandthreshold* određen prag i vrhovi napona

Kako bi se odredila vrijednost varijable  $dp$  potrebno je provesti svojevrсно baždarenje, tj. podešavanje algoritma. To baždarenje se provodi temeljem valnog oblika razlike induciranih napona, dobivene mjerenjem kod ispravnog rotora. Iako bi teoretski razlika napona dvaju svitaka u ispravnom stanju rotora trebala biti jednaka ničici (kao što je dobiveno MKE proračunom), u slučaju mjerenja na stvarnom motoru to nije slučaj. U razlici napona se ipak pojavljuje određeni iznos napona (sastavljen je od niza impulsa napona) koji je posljedica pogrešaka prilikom mjerenja, tolerancija u izradi strojeva i nesavršenosti ugradnje mjernih svitaka u zračni raspor motora. Stoga se za početnu vrijednost varijable  $dp$  uzima veličina mjerne nesigurnosti. Za konkretno analizirani slučaj to je iznos od 17,74 %. Ako se učita valni oblik razlike napona za ispravno stanje kaveznog rotora, može se dogoditi da algoritam dojaví kvar jer je neki od impulsa u razlici napona iznad praga napona koji je određen varijablom  $dp$ , kao što je prikazano slikom 8.12. U tom slučaju treba  $dp$  povećavati sve dok algoritam ne dojaví da je rotor ispravan za učitane razliku napona, koja je dobivena temeljem izmjerenih induciranih napona u ispravnom stanju. Tako podešeni algoritam će sigurno prepoznati kvarena stanja jer svaki prekid kaveznog namota u razlici napona izaziva pojavu ekstremnih vrhova napona koji su veći od praga napona određenog varijablom  $dp$ . Broj ekstremnih vrhova napona, njihova međusobna udaljenost u razlici napona i iznos ovise o vrsti prekida kaveznog namota (prekid štapova ili prstena).



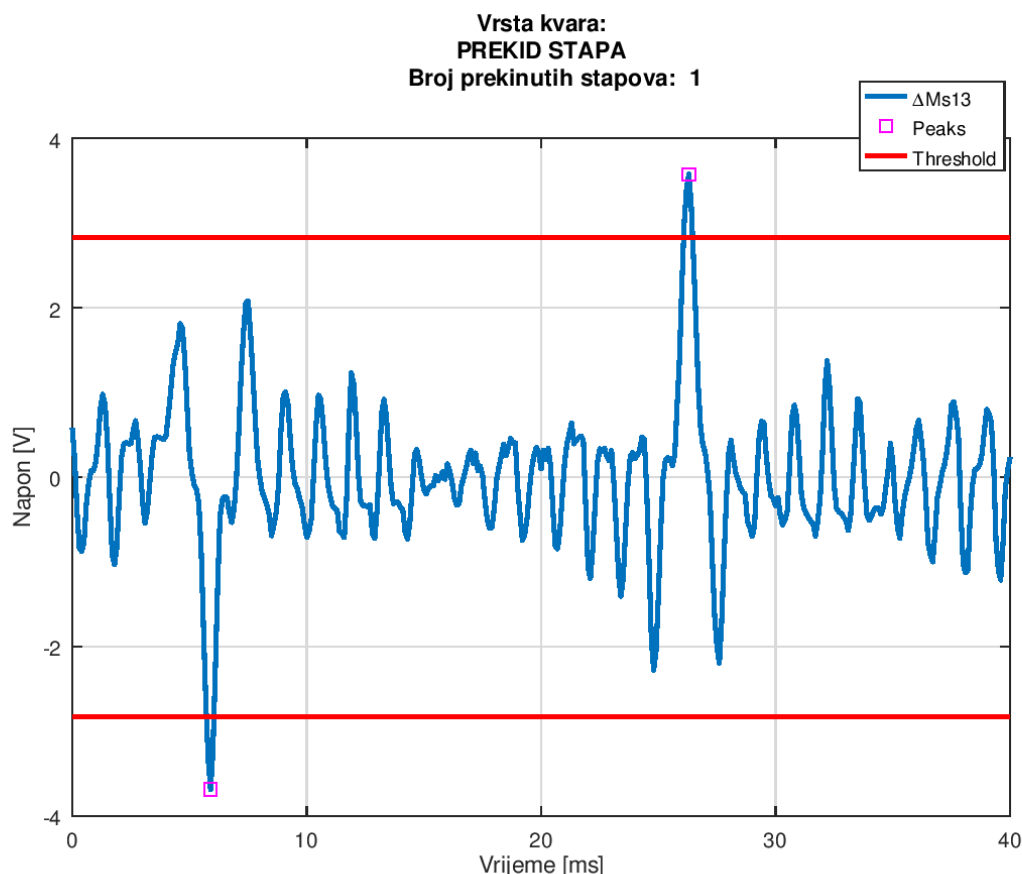
Slika 8.12 Ispis algoritma kod krivo postavljene vrijednosti varijable  $dp$  (za  $dp = 17,74\%$ )

Budući da se sa slike 8.12 vidi da za početnu vrijednost  $dp$  algoritam ispisuje pogrešnu poruku, potrebno je povećavati vrijednost  $dp$  sve dok algoritam za ovaj valni oblik ne ispiše da je rotor ispravan. Slika 8.13 prikazuje izlazni rezultat algoritma kada je ponovno učitana razlika napona dobivena za ispravno stanje rotora, ali za slučaj kada je vrijednost  $dp$  postavljena na ispravnu vrijednost. Kod vrijednosti varijable  $dp$  postavljene na 21 % algoritam je prepoznao da učitani valni oblik razlike napona odgovara ispravnom stanju rotora. Na slici 8.13 prikazana je razlika napona mjernih svitaka  $\Delta Ms13$  i postavljena granica praga napona za ispravno stanje (crvena linija). U odnosu na sliku 8.12, vidi se da algoritam za ispravno stanje nije odredio postojanje nijednog ekstremnog vrha napona u učitanoj signalu razlike napona. Time je algoritam uspješno podešen i utvrđena je temeljem valnog oblika u ispravnom stanju, vrijednost varijable  $dp$  koja se dalje koristi u algoritmu i za sve ostale valne oblike dobivene kod kvarnih stanja rotora.



Slika 8.13 Ispis algoritma za ispravno stanje kod ispravno postavljene vrijednosti varijable  $dp$

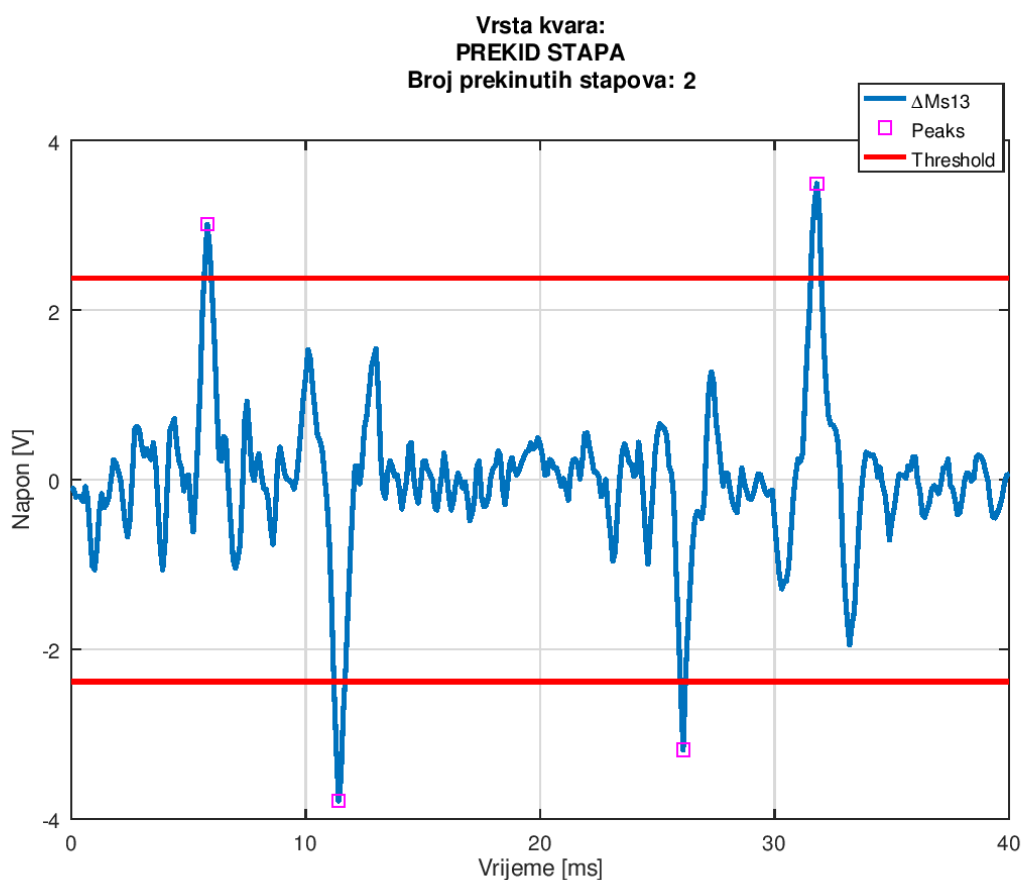
Dakle, kad je temeljem valnog oblika u ispravnom stanju podešena varijabla  $dp$ , algoritam je testiran za valne oblike razlike napona dobivene mjerenjem na motoru kod različitih kvarnih stanja rotora. Slika 8.14 prikazuje izlazni rezultat algoritma u slučaju kada je detektiran prekid jednog štapa. Na slici je dan prikaz razlike napona mjernih svitaka  $\Delta Ms13$ , postavljena granica praga napona i ekstremni vrhovi napona koji su posljedica prekida jednog štapa rotora.



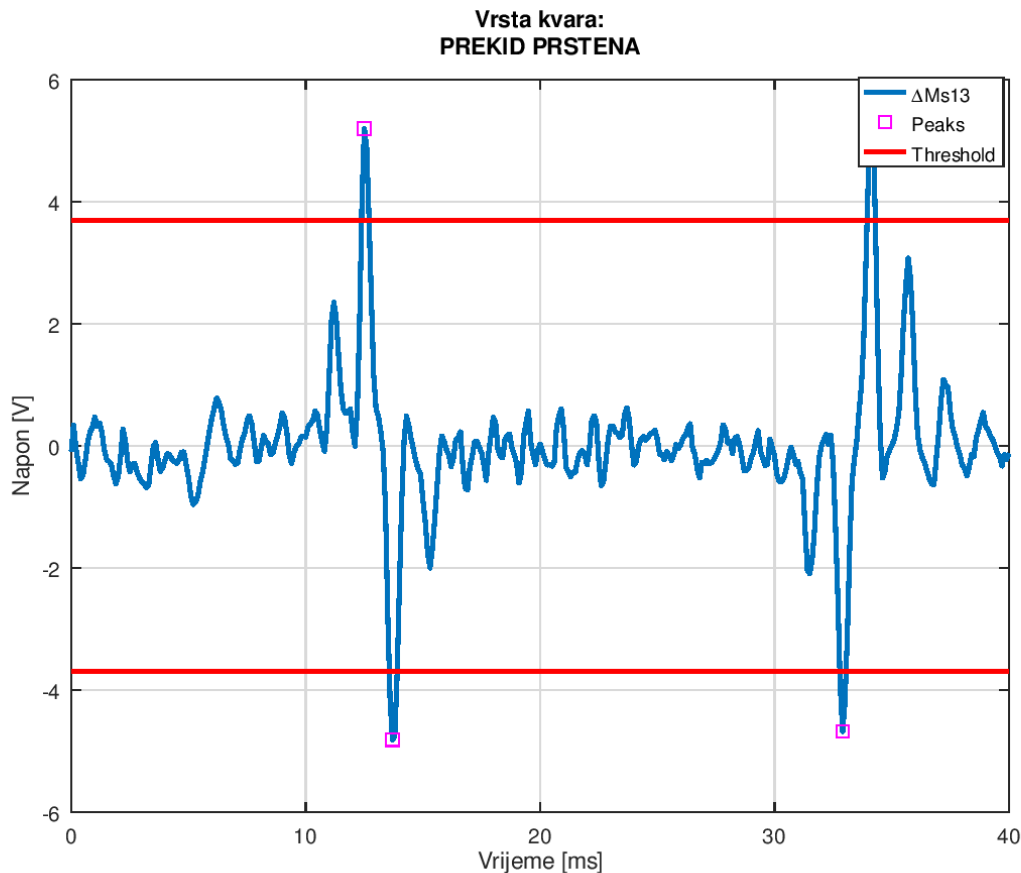
Slika 8.14 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje prekida kaveza – detekcija prekida jednog štapa

Na slici 8.15 prikazan je izlazni rezultat algoritma u slučaju kada je detektiran prekid dva štapa. Slika prikazuje razliku napona mjernih svitaka  $\Delta Ms13$ , postavljenu granicu praga napona i ekstremne vrhove napona koji su posljedica prekida dva štapa rotora. Slika 8.16 prikazuje izlazni rezultat algoritma za slučaj kada je detektiran prekid prstena. Na slici je dana razlika napona mjernih svitaka  $\Delta Ms13$ , postavljena granica praga napona i ekstremni vrhovi napona koji su posljedica prekida prstena. Budući da kod prekida dvaju štapova i prekida prstena u razlici napona imamo četiri ekstremna vrha napona, postavlja se pitanje da li može algoritam raspoznati ova dva specifična kvara kaveznog rotora. Temeljem svojstvenih karakteristika kvarova, utvrđeno je u slučaju prekida dvaju štapova da su ekstremni vrhovi međusobno udaljeni za točno određeni vremenski interval koji iznosi  $\Delta t_{\text{štap}} = 1,42$  ms ili za višekratnik tog intervala (prikazano na slikama 8.2 i 8.3). U slučaju prekida prstena pojavljivanje ekstremnih vrhova je u vremenskom intervalu koji je manji od intervala pojavljivanja vrhova u slučaju prekida štapova. Na svojstvenoj karakteristici prikazanoj na slici 8.4 taj interval za ovaj analizirani motor iznosi 1,2 ms. Ovo saznanje omogućava međusobno prepoznavanje vrste kvara. Unutar algoritma, funkcija za određivanje vrhova i praga

napona kao jedan od izlaznih argumenata nakon obrade signala vraća i informaciju o lokacijama ekstremnih vrhova. Temeljem toga algoritam prilikom prepoznavanja pojedinog kvara rotora provjerava na kojoj se međusobnoj udaljenosti u učitanoj razlici napona nalaze ti vrhovi. Ukoliko međusobna udaljenost ekstrema odgovara vremenskom intervalu od 1,42 ms ili njegovom višekratniku (u algoritmu je taj vremenski interval reprezentiran odgovarajućim brojem točaka) tada algoritam prepoznaje da učitani valni oblik razlike napona je posljedica prekida štapova. Ako je taj interval pojavljivanja ekstremnih vrhova manji od intervala 1,42 ms tada algoritam prepoznaje da su ti vrhovi posljedica prekida prstena.



Slika 8.15 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje prekida kaveza – detekcija prekida dva štap



Slika 8.16 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje prekida kaveza – detekcija prekida prstena

Opravdano je pitanje može li predloženi algoritam biti primjenjiv i na ostale asinkrone kavezne motore. Za pravilno funkcioniranje algoritma nužno je poznavanje određenog broja ulaznih parametara za neki motor. To su parametri poput točnog broja štapova rotora, polaritet stroja temeljem kojeg se određuje ukupno trajanje učitanoog signala i frekvencija uzorkovanja signala s mjernih svitaka ugrađenih u zračni raspored motora. Nadalje, sam algoritam se zasniva na vrijednostima koje se temelje na induciranim naponima u mjernim svicima. Kao što je prije rečeno, za otkrivanje prekida kaveza (bilo štapova bilo prstena rotora) je dovoljno analizirati valni oblik razlike napona dvaju mjernih svitaka prostorno razmaknutih za polni korak ili njegov višekratnik. Stoga je potrebno, za ispravan rad algoritma učitati upravo takav signal. Ono što je ključno za rad algoritma je određivanje vrijednosti varijable  $dp$ . Prethodno je pokazano da se ova varijabla određuje temeljem razlike napona mjernih svitaka u ispravnom stanju. Za svaki drugi motor na koji bi se primjenio ovaj algoritam, prvo je potrebno odrediti valni oblik razlike napona u ispravnom stanju (na osnovu izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima razmaknutima za  $\tau_p$ ), a potom i odrediti vrijednost mjerne nesigurnosti. Kad su ta dva parametra određena definira se početni iznos varijable  $dp$  veličinom izračunate

mjerne nesigurnosti. U slučaju da se za tako početnu postavljenu vrijednost varijable  $dp$  ne ispisuje očekivana poruka za učitani valni oblik razlike napona u ispravnom stanju, varijablu je potrebno dodatno povećati. Podešavanje varijable  $dp$  se provodi na način da se prva postavljena vrijednost postepeno povećava do one vrijednosti za koju će algoritam dojaviti da je kavez rotora ispravan. Tako podešeni algoritam omogućava pouzdano otkrivanje bilo koje vrste kvara kaveznog namota.

Dakle, algoritam za otkrivanje prekida kaveznog namota baziran je na metodi koja se sastoji od praćenja induciranih napona u mjernim svicima prostorno razmaknutih za polni korak. Korištenjem metode oduzimanja napona koji se inducira u dva svitka prostorno razmaknuta za dvostruki polni korak dobiva se valni oblik razlike napona koji se potom obrađuje i analizira. Za ispravan rad algoritma nužno je učitati valni oblik razlike napona dobiven mjerenjem u ispravnom stanju kaveza. To je potrebno kako bi se ispravno postavili početni parametri i omogućilo da algoritam ispravno otkriva pojavu povećanja vrhova napona koji su posljedica prekida kaveza namota, bilo štapova bilo prstena. Glavna prednost ovog algoritma je to što koristi metodu koja ne zahtijeva složenu obradu harmonijskog sastava ulaznog signala, kao što je slučaj kod mnogih drugih metoda poput primjerice spektralne analize statorske struje. Pokazano je da metoda temeljena na analizi razlike induciranih napona pouzdano otkriva i raspoznaje vrstu prekida kaveznog namota, odnosno otkriva kvarna stanja.

### **8.2.2 Algoritam za otkrivanje pojave statičkog ekscentriciteta rotora**

Na temelju rezultata proračuna i mjerenja razvijena je druga grana algoritma koja otkriva pojavu statičkog ekscentriciteta kaveznog rotora. Odgovarajući kôd ovog dijela algoritma dan je u Prilogu C. Za razliku od prethodno dvaju analiziranih vrsta kvarova rotora, sada je potrebno na osnovi učitanih vrijednosti iz faze 1 u daljnjoj obradi i analizi podataka koristiti naponske vrijednosti svih četiriju mjernih svitaka koji su međusobno razmaknuti za polni korak  $\tau_p$ . Algoritam kao ulazne vrijednosti koristi inducirane napone u svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 za jedan puni okret rotora motora. Za svaki pojedini napon svitka potrebno je odrediti njegovu efektivnu vrijednost. Koristeći funkciju za izračun efektivne vrijednosti napona određene su efektivne vrijednosti koje se redom spremaju u varijable  $U_{ef\_Ms1}$ ,  $U_{ef\_Ms2}$ ,  $U_{ef\_Ms3}$  i  $U_{ef\_Ms4}$ . Nakon što je određena efektivna vrijednost napona svakog svitka, unutar algoritma odvijaju se dvije uvjetne (*if*) petlje. Prva petlja međusobno uspoređuje efektivne vrijednosti napona u svicima Ms1 i Ms3 te određuje iznos njihovog

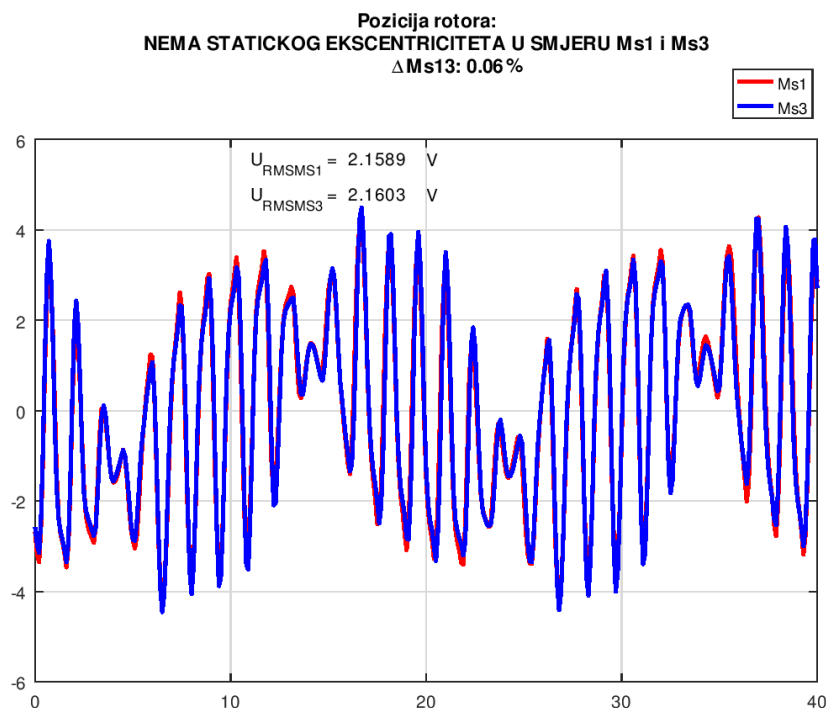
međusobnog odstupanja. Na osnovi dobivenog iznosa odstupanja provjerava se uvjet je li odstupanje unutar dozvoljenih granica. Uvjet dozvoljenog odstupanja u iznosu od 8,32 % određen je na temelju analize mjerenja. Zapravo, ovo odstupanje je u korelaciji s mjernom nesigurnošću koja u obzir uzima samo one parametre koji mogu utjecati na iznos izmjerene napona u mjernom svitku. Parametri koji mogu utjecati na inducirani napon navedeni su u tablici 3.6, a to su redom: mjerna nesigurnost korištene mjerne stanice (mjerni uređaj), nesavršenost ugradnje mjernih svitaka u zračni raspored motora, tolerancije u izradi statorskog paketa i dopuštene tolerancije u nesimetriji zračnog rasporeda. Izračunata mjerna nesigurnost ovih faktora ukupno iznosi  $\pm 8,32$  %. Stoga je tako određeni iznos uzet kao dozvoljeno međusobno odstupanje između efektivnih vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima. Također, su za ovaj motor dodatno analizirani još i rezultati dobiveni mjerenjem, kako bi se utvrdilo da je odstupanje inducirane napona od 8,32 % između mjernih svitaka dovoljno prihvatljiv uvjet za određivanje međusobne nesimetrije efektivnih napona svitaka. Iz rezultata dobivenih mjerenjem (što je prikazano u tablicama 6.3 i 6.4) može se vidjeti da primjerice kod iznosa ekscentriciteta od 5 % međusobno odstupanje između induciranih napona mjernih svitaka se kreće od 5 % do 10 % (ovisno o analiziranom slučaju pomaka rotora u  $\pm x$  ili  $\pm y$  smjeru). Ako se dalje promotre rezultati u spomenutim tablicama, može se utvrditi da kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 10 % međusobno odstupanje napona u promatranim svicima se kreće od 10 % do 20 % (što je opet ovisno o analiziranom slučaju pomaka rotora). To je dodatna potvrda da je uvjet u algoritmu ispravno odabran i omogućuje da se na osnovi njega pouzdano mogu otkriti iznosi statičkog ekscentriciteta rotora u iznosu od 10 % na više. Pretpostavlja se da bi ovakvo određivanje uvjeta u algoritmu trebalo biti općenito primjenjivo na sve asinkrone motore, budući da su navedeni utjecaji (pogreška mjerenja, tolerancije i greške prilikom ugradnje) prisutni i kod bilo kojeg drugog asinkronog motora.

Stoga, u svrhu općenite primjene ove grane algoritma potrebno je uvijek prvo odrediti iznos mjerne nesigurnosti za odabrani motor. Tako određena mjerna nesigurnost koristi se kao početni uvjet u algoritmu za otkrivanje statičkog ekscentriciteta. U slučaju da odabrana granica za uvjet nije dovoljno dobro odabrana, potrebno je provesti baždarenje ove grane algoritma (po sličnom postupku kao i u slučaju otkrivanja prekida kaveznog namota). To baždarenje se provodi temeljem valnih oblika i iznosa efektivnih vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima, dobivenih mjerenjem kod ispravnog rotora (rotor u centru rotacije). Teoretski bi inducirani napon u sva četiri mjerna svitka razmaknuta za  $\tau_p$  trebao biti po efektivnoj vrijednosti i valnom obliku identičan (kao što je i dobiveno MKE proračunom).

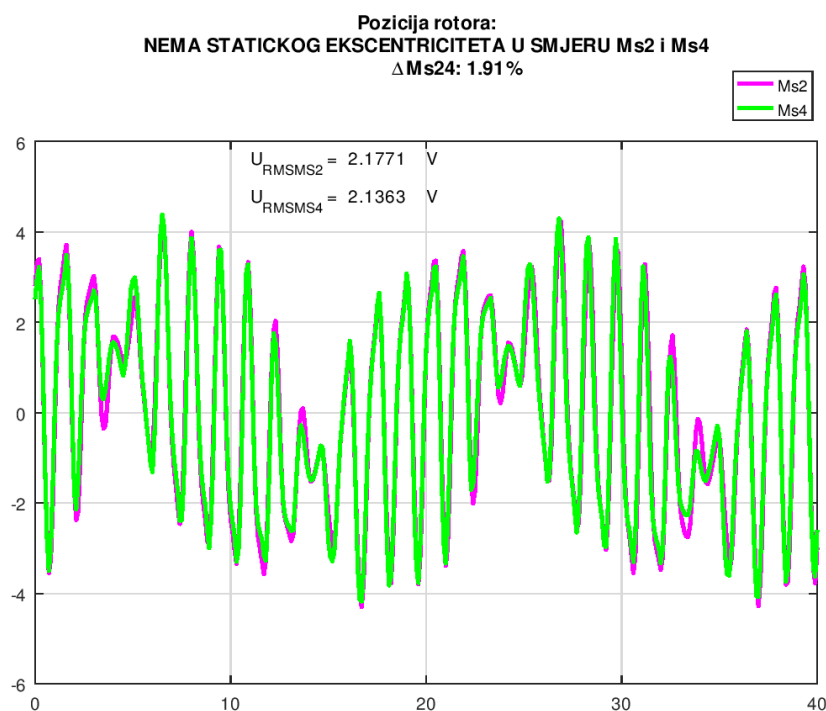
Kako to u slučaju mjerenja na stvarnom motoru nije slučaj, može se dogoditi da uvjet određen samo temeljem iznosa mjerne nesigurnosti nije dovoljno dobar, odnosno algoritam može dojaviti da postoji ekscentričnost, a u stvari je nema. Stoga, vrijednost dozvoljenog odstupanja potrebno je podesiti na način da se vrijednost povećava do one vrijednosti međusobnog odstupanja induciranih napona koje je dobiveno kod mjerenja u ispravnom stanju, odnosno kada je rotor u centru rotacije.

Ovaj algoritam u slučaju ako je odstupanje unutar dozvoljene vrijednosti, odnosno nije otkriven statički ekscentricitet ispisuje poruku *"NEMA STATIČKOG EKSCENTRICITETA U SMJERU Ms1 i Ms3"*. U slučaju odstupanja većeg od dopuštenog (otkriven statički ekscentricitet), algoritam određuje u kojem smjeru se je dogodio pomak rotora (ispis poruke *"STATIČKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms1"* ili *"STATIČKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms3"*) te koliko iznosi postotno odstupanje između induciranih napona svitaka koji se međusobno uspoređuju. Također algoritam ispisuje i prikazuje efektivne vrijednosti napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3. Analogno, druga uvjetna petlja međusobno uspoređuje efektivne vrijednosti napona u Ms2 i Ms4 te određuje iznos njihovog odstupanja. Ponovno se na osnovi dobivenog iznosa odstupanja provjerava uvjet je li odstupanje unutar dozvoljene granice. Vrijednost dozvoljenog odstupanja je istovjetno kao i u slučaju prve petlje. Ukoliko je odstupanje unutar dozvoljene vrijednosti, tada algoritam ispisuje poruku *"NEMA STATIČKOG EKSCENTRICITETA U SMJERU Ms2 i Ms4"*. U slučaju odstupanja većeg od dopuštenog, algoritam određuje u kojem smjeru se je dogodio pomak rotora (ispis poruke *"STATIČKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms2"* ili *"STATIČKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms4"*) te koliko iznosi postotno odstupanje između induciranih napona svitaka koji se međusobno uspoređuju. Također algoritam ispisuje i prikazuje efektivne vrijednosti napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4. Što je iznos tog međusobnog odstupanja napona po efektivnoj vrijednosti veći, za očekivati je da je u motoru prisutan i veći iznos statičkog ekscentriciteta rotora. Time je ispunjena osnovna funkcija algoritma da pouzdano signalizira pojavu prisutnosti statičkog ekscentriciteta i smjer pomaka rotora. Izlazni rezultat algoritma je grafički prikaz induciranih napona u mjernim svicima i to posebno usporedba induciranih napona u svicima Ms1 i Ms3 te posebno svitaka Ms2 i Ms4. Također osim grafičkog prikaza odstupanja valnih oblika, algoritam ispisuje prema kojem mjernom svitku se je dogodio pomak rotora, efektivne vrijednosti induciranih napona te koliko iznosi postotno odstupanje efektivnih vrijednosti napona uspoređenih svitaka. Zaključno algoritam za otkrivanje statičkog ekscentriciteta izrađen je na temelju rezultata MKE proračuna, a verificiran rezultatima mjerenja te su u nastavku prikazani izlazni rezultati algoritma za nekoliko analiziranih slučajeva pomaka

rotora u  $\pm x$  i  $\pm y$  smjeru. Na slici 8.17 i 8.18 prikazani su izlazni rezultati algoritma za slučaj ispravnog stanja rotora motora, odnosno kada nije prisutan statički ekscentricitet.

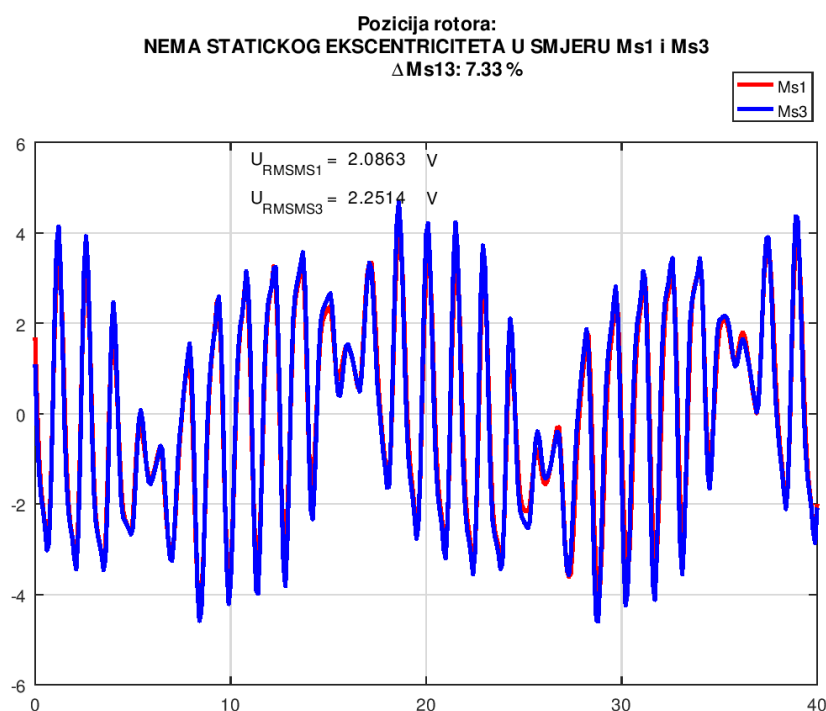


Slika 8.17 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – ispravno stanje

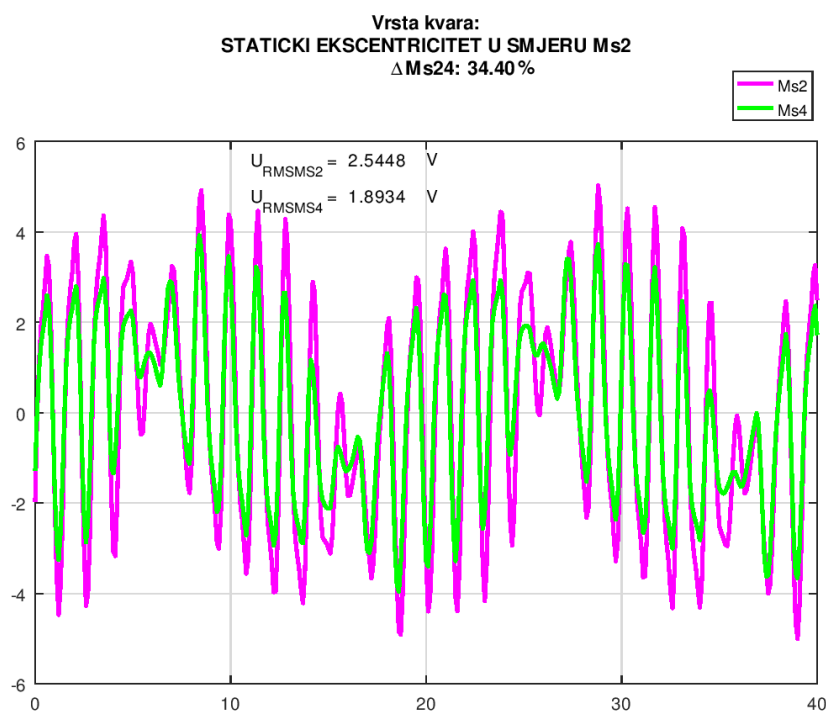


Slika 8.18 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – ispravno stanje

Na slici 8.19 i 8.20 prikazani su izlazni rezultati algoritma za slučaj pojave statičkog ekscentriciteta u iznosu 25 % i pomaka rotora u smjeru + x osi.

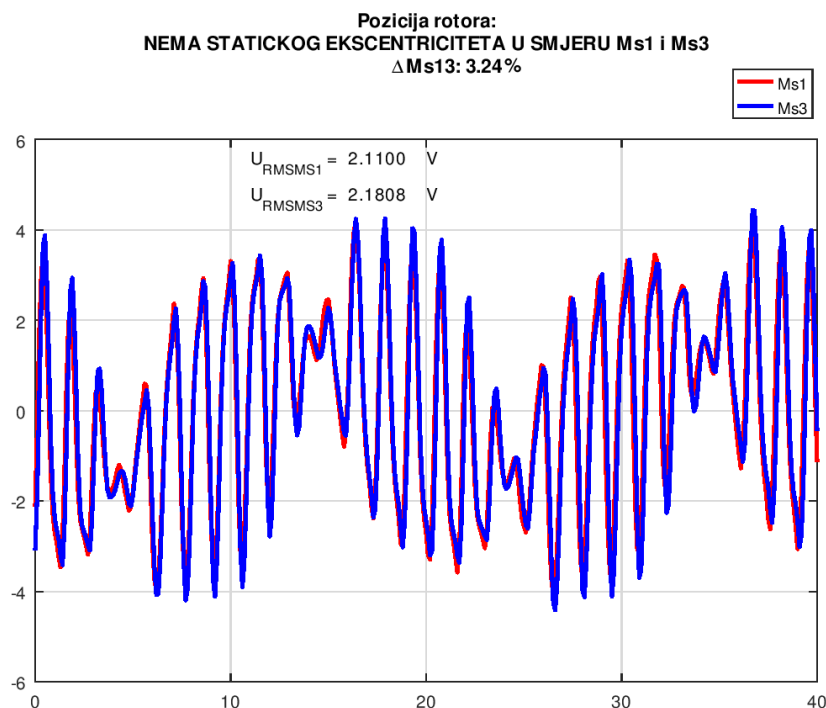


Slika 8.19 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru + x za 25 %

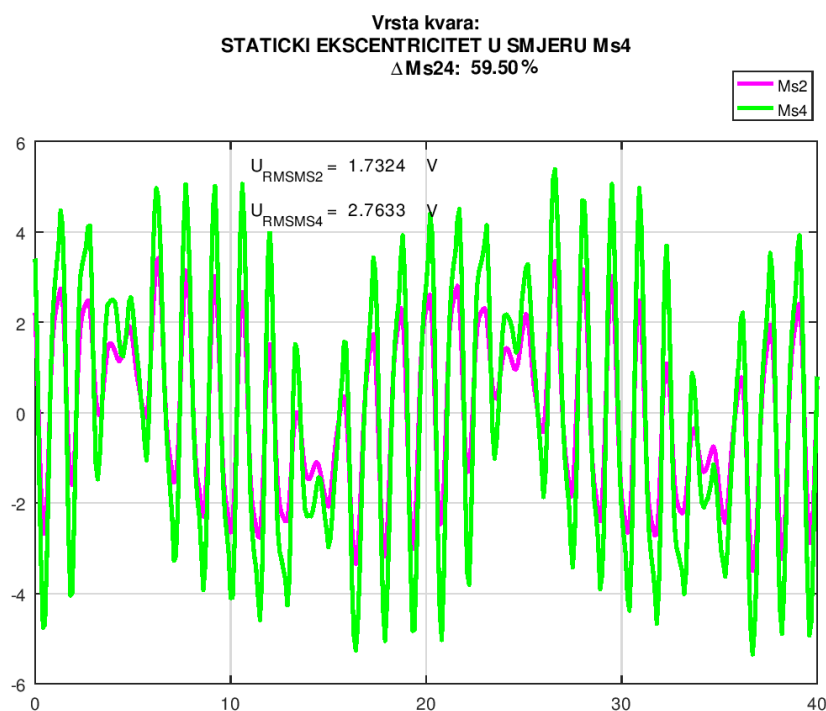


Slika 8.20 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru + x za 25 %

Na slici 8.21 i 8.22 prikazani su izlazni rezultati algoritma za slučaj pojave statičkog ekscentriciteta u iznosu 35 % i pomaka rotora u smjeru  $-x$  osi.

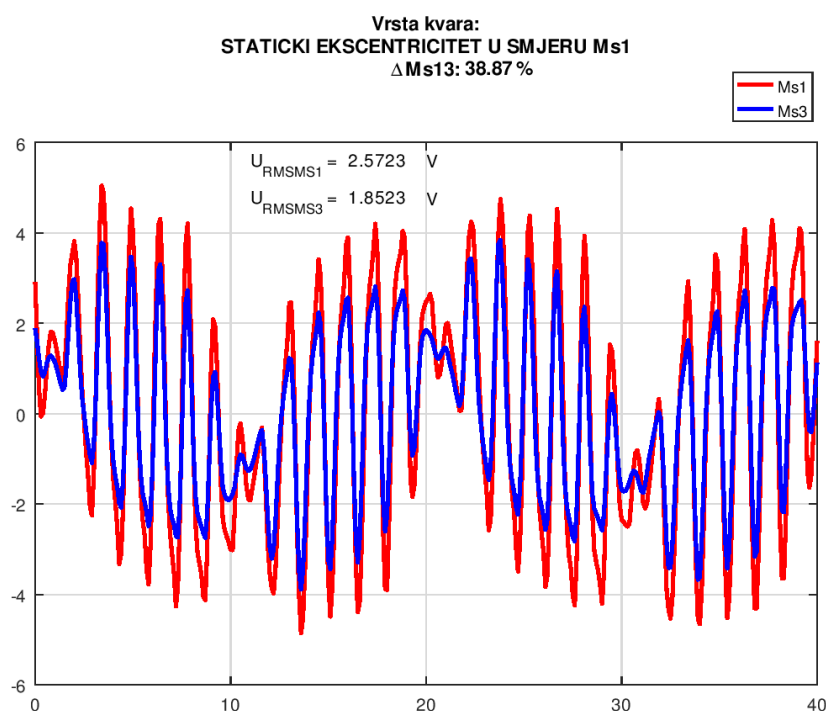


Slika 8.21 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru  $-x$  za 35 %

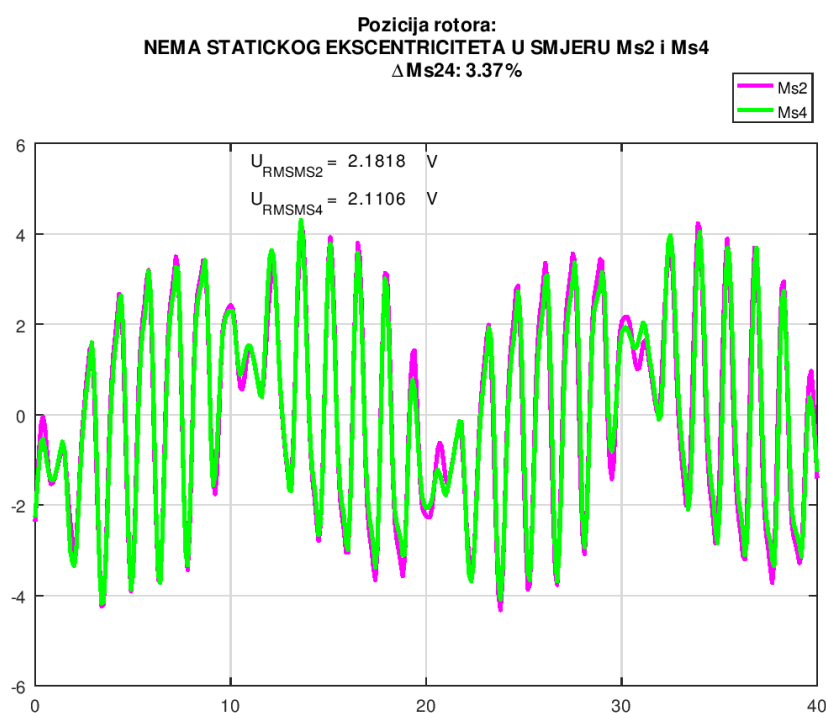


Slika 8.22 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru  $-x$  za 35 %

Na slici 8.23 i 8.24 prikazani su izlazni rezultati algoritma za slučaj pojave statičkog ekscentriciteta u iznosu 20 % i pomaka rotora u smjeru + y osi.

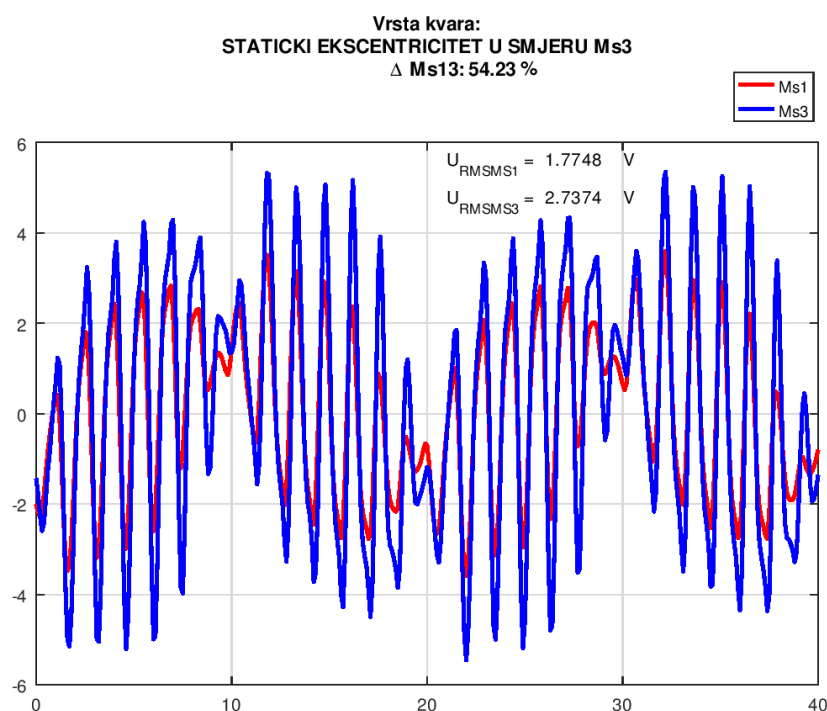


Slika 8.23 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru + y za 20 %

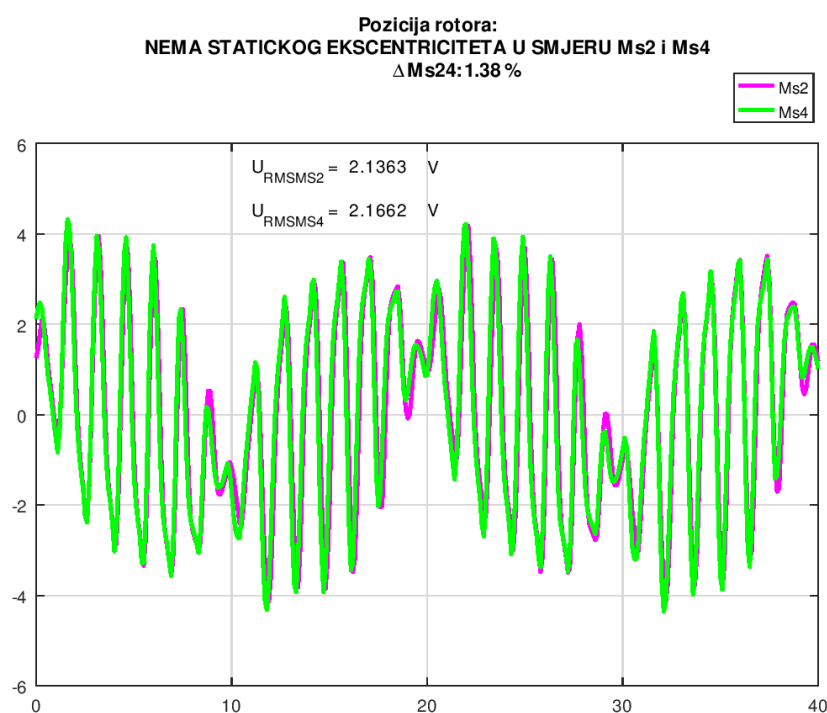


Slika 8.24 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru + y za 20 %

Na slici 8.25 i 8.26 prikazani su izlazni rezultati algoritma za slučaj pojave statičkog ekscentriciteta u iznosu 30 % i pomaka rotora u smjeru  $-y$  osi.

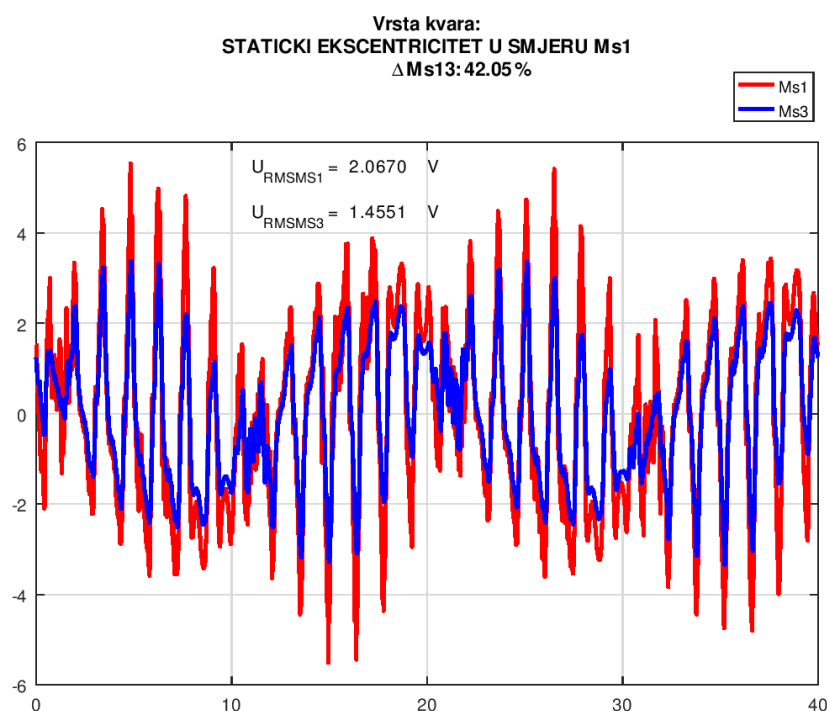


Slika 8.25 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru  $-y$  za 30 %

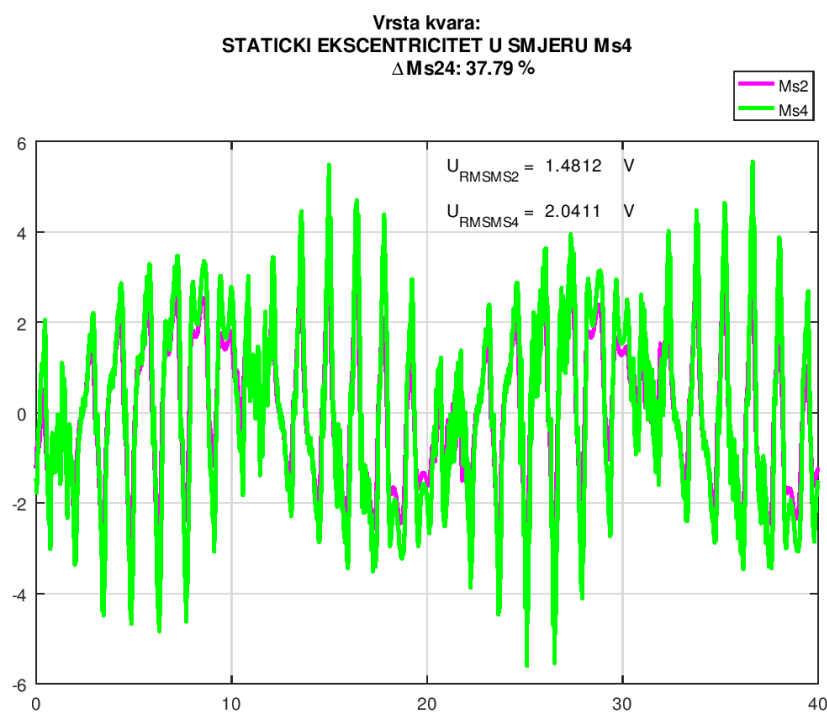


Slika 8.26 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru  $-y$  za 30 %

Na slici 8.27 i 8.28 prikazani su izlazni rezultati algoritma za slučaj pojave statičkog ekscentriciteta u iznosu 25 % i to za pomak rotora u smjeru  $-x$  osi te smjeru  $+y$  osi.



Slika 8.27 Grafički prikaz rezultata algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta – detekcija statičkog ekscentriciteta



Slika 8.28 Grafički prikaz rezultata algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta – detekcija statičkog ekscentriciteta

Dakle, izlazni rezultati algoritma za slučaj otkrivanja statičkog ekscentriciteta pokazuju da se kontinuiranim praćenjem efektivne vrijednosti induciranih napona u svakom pojedinom svitku i njihovog međusobnog odstupanja, pouzdano može otkriti pojava ekscentriciteta. Budući da narušavanje same simetričnosti napona induciranih u svicima pokazuje da rotor motora nije više u centru vrtnje, osim pojave statičkog ekscentriciteta moguće je ustvrditi i smjer pomaka rotora. Temeljem poznatog rasporeda ugrađenih svitaka u motor, predloženi algoritam ispisuje poruku prema kojem mjernom svitku se je dogodio pomak. Stoga se može točno odrediti, je li smjer pomaka rotora u  $\pm x$  ili  $\pm y$  os.

## 9. Zaključak

U sklopu disertacije obrađeno je područje otkrivanja kvarova rotora kaveznoga asinkronog motora. Analizirani kvarovi su prekid jednog i više štapova kaveznog namota, prekid prstena kaveza i pojava statičkog ekscentriciteta. Metoda koja je korištena u svrhu ranog i točnog otkrivanja navedenih kvarova je napon koji se inducira u mjernim svicima smještenima na zub statora, uslijed promjenjivoga okretnog magnetskog polja rotora. U cilju pouzdanog otkrivanja pojedinog kvara rotora razrađena je odgovarajuća metodologija obrade induciranih napona u mjernim svicima prostorno razmaknutih za polni korak motora. Obrada tih napona podrazumijeva da se u slučaju prekida kaveznog namota (bilo štap bilo prsten) primjenjuje oduzimanje napona induciranih u mjernim svicima razmaknutim za dvostruki polni korak. Kod pojave statičkog ekscentriciteta, obrada induciranih napona podrazumijeva određivanje efektivne vrijednosti napona u sva četiri mjerna svitka razmaknuta za polni korak te međusobnu usporedbu istih s ciljem utvrđivanja njihovog međusobnog odstupanja odnosno utvrđivanja njihove nesimetričnosti.

U svrhu analize i određivanja potrebnoga i optimalnog broja mjernih svitaka te karaktera pojedine vrste kvara rotora, prvo je bio proveden niz MKE proračuna. Nakon toga, provedena su i odgovarajuća mjerenja na asinkronom motoru u laboratoriju s ciljem potvrđivanja teza i verifikacije rezultata MKE proračuna za svaki analizirani kvar. Proračunima i mjerenjima je utvrđeno da je za funkcionalnost ove metodologije prepoznavanja pojedine vrste kvara rotora nužno u zračni raspored motora ugraditi najmanje četiri mjerna svitka.

Na početku je analiziran utjecaj oštećenja kaveza i statičkog ekscentriciteta asinkronog motora na inducirane napone u mjernim svicima. MKE proračunima i mjerenjima je pokazano da svaki kvar kaveznog rotora ima svojstvenu karakteristiku koja se na svoj način očituje kroz inducirane napone u mjernim svicima. Potvrđeno je da svaki kvar drugačije djeluje na inducirane napone te zajedno u kombinaciji s korištenjem principa metode oduzimanja induciranih napona je moguće odrediti taj utjecaj. Svojstvene karakteristike svakoga pojedinog kvara opisane su i prikazane u osmom poglavlju doktorske disertacije.

Zatim je određen optimalni raspored i položaj mjernih svitaka za određivanje kvarova. U sklopu disertacije MKE proračunima i mjerenjima na stvarnom stroju utvrđen je potreban broj, raspored i položaj mjernih svitaka koji se smještaju u zračni raspored motora. Svitke za pouzdano i točno otkrivanje kvarova potrebno je pozicionirati na zub statora na način da su međusobno razmaknuti za polni korak motora,  $\tau_p$ . Time se osigurava da se u mjernim svicima inducira napon koji se u zavisnosti o parnosti višekratnika polnog koraka  $\tau_p$  može oduzeti, tj. da se na taj napon prilikom obrade može primijeniti metoda oduzimanja induciranih napona. Osim

optimalnog rasporeda i položaja mjernih svitaka određen je i broj svitaka koji je potrebno ugraditi u zračni raspored motora. MKE proračunom i mjerenjima pokazano je da je za ovaj konkretni asinkroni motor potrebno ugraditi najmanje četiri mjerna svitka međusobno razmaknuta za polni korak. Također, na temelju ovih istraživanja može se izvesti zaključak da je nužno i u slučaju nekoga drugog polariteta asinkronog motora, za funkcionalnost metodologije prepoznavanja kvarova rotora ugraditi u zračni raspored motora najmanje četiri mjerna svitka.

Na kraju je razvijen algoritam za prepoznavanje kvarova temeljem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima. Budući da je dokazano proračunima i mjerenjima da se svaki kvar drugačije očituje na inducirane napone u mjernim svicima, moguće je izraditi algoritam koji će na osnovu svojstvenih karakteristika prepoznati pojedinu vrstu kvara rotora. Algoritam je detaljno prikazan i objašnjen u osmom poglavlju, gdje je dan dijagrama toka. Predloženi algoritam se ustvari sastoji od dvije grane algoritma koje su temeljene na izvedenim svojstvenim karakteristikama, koje omogućavaju pouzdano raspoznavanje pojedinog kvara. Dakle, algoritam za otkrivanje prekida kaveza i statičkog ekscentriciteta rotora baziran je na metodi koja se sastoji od praćenja induciranih napona u mjernim svicima prostorno razmaknutih za polni korak. Za otkrivanje prekida kaveza namota algoritam analizira promjene u valnom obliku razlike napona dvaju svitaka, dok u slučaju statičkog ekscentriciteta analizira promjene u veličini efektivne vrijednosti induciranih napona u četiri mjerna svitka. U odnosu na brojne metode koje za otkrivanje kvarova rotora koriste analizu harmonijskog sastava ulaznog signala, ovdje je primjenjena metoda koja na osnovu valnih oblika induciranih napona i promjenama u tim signalima pouzdano otkriva i međusobno prepoznaje pojedini kvar kaveznog rotora motora.

Analiza induciranih napona u mjernim svicima, koji su razmaknuti međusobno za polni korak, pokazala se pouzdanom i primjenjivom za rano otkrivanje kvarova rotora asinkronoga kaveznog motora. U kombinaciji s korištenjem metode oduzimanja induciranih napona omogućava otkrivanje svih vrsta kvarova rotora te također, omogućava i međusobno raspoznavanje pojedine vrste kvara. Time se metoda pokazuje primjenjiva, pouzdana i korisna u području monitoringa električnih rotacijskih strojeva.

U svrhu daljnjih istraživanja te na temelju rezultata dobivenih tokom ovog istraživanja planirano je daljnje testiranje metode na drugačijim izmjeničnim strojevima. Pod time se podrazumijeva testiranje i verifikacija metode temeljene na mjernim svicima kod sinkronih strojeva, kao što su klasični hidrogeneratori i turbogeneratori te strojevi s permanentnim magnetima. Posebno bi se istraživanja odnosila na otkrivanje statičkog ekscentriciteta kod

navedenih strojeva. Također, rezultate istraživanja trebalo bi verificirati i na asinkronim kaveznim motorima koji imaju različiti polaritet od analiziranog motora. Isto tako, budući da su ova istraživanja provedena kod sinusnog napajanja asinkronog motora, u svrhu verifikacije metode podrazumijevaju se i dodatna istraživanja kod motora napajanih preko pretvarača frekvencije.

## 10. Literatura

- [1.] 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.
- [2.] P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding: "Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines", The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2008.
- [3.] O.V. Thorsen, M. Dalva: "A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries", *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 31, No.5, September/October 1995.
- [4.] O.V. Thorsen, M. Dalva: "Failure Identification and Analysis for High Voltage Induction Motors in Petrochemical Industry", IEEE, 1998.
- [5.] A. Elez, S. Car, S. Tvorčić, B. Vaseghi: "Rotor Cage and Winding Fault Detection Based on Machine Differential Magnetic Field Measurement (DMFM)", *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 53, No. 3, May – June 2017.
- [6.] A. Elez, S. Car: "Metoda za otkrivanje oštećenja rotorskog namota rotacijskih izmjeničnih strojeva diferencijalnim mjerenjem magnetskog polja pomoću dva mjerna svitka", Patentna prijava broj P20120245A, Zagreb 2012.
- [7.] 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.
- [8.] A. Elez: "Sustav za otkrivanje međuzavoynih kratkih spojeva namota sinkronih strojeva", Doktorska disertacija, FER, Zagreb, 2010.
- [9.] B. Liang, B.S. Payne, A.D. Ball, S.D. Iwnicki: "Simulation and fault detection of three-phase induction motors", Elsevier, *Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 60, 2002.
- [10.] C. Gupta, S. Marwaha, M.S. Manna: "Finite element method as an aid to machine design: A computational tool", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2009, Bangalore, India, 2009.
- [11.] Infolytica MagNet User Manual: "An Introduction to MAGNET for Static 2D Modeling", Infolytica Corporation, Montreal, Quebec, Canada, 2007.

- [12.] M.J. Picazo-Rodenas, R. Royo, J. Antonino-Daviu, J. Roger-Folch: "Use of infrared thermography for computation of heating curves and preliminary failure detection in induction motors", ICEM 2012, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, September 2012.
- [13.] B.M. Ebrahimi, J. Faiz, S. Lotfi-fard, P. Pillay: "Novel indices for broken rotor bars fault diagnosis in induction motors using wavelet transform", Elsevier ScienceDirect, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing 30, 131-145, February 2012.
- [14.] R.R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran, R.G. Bartheld: "Motor bearing damage detection using stator current monitoring", IEEE transactions on industry applications, Vol. 31, No.6, November/December 1995.
- [15.] M. Petrinić: "Proračun elektromagnetskih sila metodom konačnih elemenata za različita pogonska stanja sinkronog generatora", Kvalifikacijski doktorski ispit, FER, Zagreb, Svibanj 2011.
- [16.] C.C. Yeh, G. Sizov, A. Sayed-Ahmed, N.A.O. Demerdash, R.J. Povinelli, E.E. Yaz, D.M. Ionel: "A Reconfigurable Motor for Experimental Emulation of Stator Winding Interturn and Broken Bar Faults in Polyphase Induction Machines", IEEE transactions on energy conversion, Vol. 23, No. 4, December 2008.
- [17.] M. Yadav, S. Wadhwani: "Vibration analysis of bearing for fault detection using time domain features and neural network", International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering, Volume-1, Issue-1, 2011.
- [18.] N. Mehala: "Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis", PhD Thesis, Electrical Engineering Department, National Institute of Technology, Kurukshetra, India, October 2010.
- [19.] P. O'Donnell: "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations Parts I, II and III", IEEE Transactions on Industry Applications, Motor Reliability Working Group, IEEE Industry Applications Society, July/August, 1985, January/February 1987.
- [20.] S. Tvorčić: "Vrste kvarova asinkronog kaveznog motora", Seminarski rad iz predmeta Relejna zaštita, FER, Zagreb, Travanj 2012.
- [21.] Ž. Hederić, M. Barukčić, K. Miklošević: "Analitički proračun osovinskih struja kod motora s homogenim jarmom", Energija, Vol. 58, No. 1, Zagreb, 2009.

- [22.] 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.
- [23.] URL: <http://www.machinerylubrication.com/Read/1041/detecting-bearing-failure>.
- [24.] S. Tvorčić: "Utvrđivanje prisutnosti kvara rotora asinkronog vučnog motora metodom konačnih elemenata", Seminarski rad iz predmeta Numerički proračuni elektromagnetske kompatibilnosti, FER, Zagreb, Rujan, 2011.
- [25.] M.L. Sin, W.L. Soong, N. Ertugrul: "Induction machine on-line monitoring and fault diagnosis – a survey", AUPEC 2003, Australasian Universities Power Engineering Conference, Christchurch, New Zealand, October 2003.
- [26.] I. Ahmed, R. Supangat, J. Grieger, N. Ertugrul, W.L. Soong: "A Baseline Study for On-Line Condition Monitoring of Induction Machines", AUPEC 2004, Australasian Universities Power Engineering Conference, Brisbane, Australia, September 2004.
- [27.] A. Siddique, G.S. Yadava, B. Singh: "A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors", *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 20, No. 1, March 2005.
- [28.] L. Frosini, A. Borin, L. Girometta, G. Venchi: "A novel approach to detect short circuits in low voltage induction motor by stray flux measurement", ICEM 2012, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, September 2012.
- [29.] L. Frosini, A. Borin, A. Albini, F. Benzi: "New techniques to simulate and diagnose stator winding faults in low voltage induction motors", ICEM 2012, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, September 2012.
- [30.] R. Pusca, R. Romary, A. Ceban: "Detection of Inter-turn Short Circuits in Induction Machines Without Knowledge of Healthy State", ICEM 2012, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, September 2012.
- [31.] D. Diaz, M.C. Amaya, A. Paz: "Inter-turn Short-circuit Analysis in an Induction Machine by Finite Elements Method and Field Tests", ICEM 2012, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, September 2012.

- [32.] S.S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat, D.A. Kkuburi: "Impedance Angle Changes Analysis Applied to Short Circuit Fault Detection", ICEM 2012, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, September 2012.
- [33.] M.J. Picazo-Rodenas, R. Royo, J. Antonino-Daviu, J. Roger-Folch: "Use of Infrared thermography for computation of heating curves and preliminary failure detection in induction motors", ICEM 2012, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, September 2012.
- [34.] N.M. Elkasabgy, A.R. Eastham, G.E. Dawson: "Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine", IEEE transactions on industry applications, Vol. 28, No.1, January/February 1992.
- [35.] M.E.H. Benbouzid: "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection", IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 47, No.5, October 2000.
- [36.] S. Štefanko, M. Bogut, D. Paljan, D. Krušelj, I. Kurtović, M. Momić: "Detekcija prekida kaveza rotora asinkronog motora", Elektrotehnika ELTHB2, Vol. 43, No. 3-4, Zagreb, 2000.
- [37.] F. Villada, D.R. Cadavid, J.E. Aedo, B.A. Benavides, E. Velilla: "The negative sequence impedance as fault indicator in induction motors", Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia No. 52, pp. 226-232, Marzo 2010.
- [38.] A.U. Jawadekar, G. Dhole, S. Paraskar: "Novel Wavelet ANN Technique to Classify Interturn Fault in Three Phase Induction Motor", International Journal of Advancements in Technology, Vol. 2, No. 2, April 2011.
- [39.] M. Sreedevi, P.J. Paul: "Stator Fault Detection and Diagnosis of a Induction Motor Using Neuro Fuzzy Logic", International Journal of Electrical and Power Engineering, Vol. 5, No. 2, 2011.
- [40.] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, H. Razika: "A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis", Elsevier, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.21, 2007.
- [41.] I. Aydin, M. Karakose, E. Akin: "A new method for early fault detection and diagnosis of broken rotor bars", Elsevier, Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 4, April 2011.

- [42.] W.T. Thomson: "A Review of On-line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors – Past, Present and Future", Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, IEEE SDEMPED'99, Vol. 7, pp. 3-18, September 1999.
- [43.] A.Y. Ben Sasi, F. Gu, Y. Li, A.D. Ball: "A validated model for the prediction of rotor bar failure in squirrel-cage motors using instantaneous angular speed", Elsevier, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.20, 2006.
- [44.] K.Dhuness: "An investigation into aspects of the online detection of broken rotor bars in induction motors", Dissertation, Electrical and Electronic Engineering, University of Johannesburg, December 2006.
- [45.] C.G. Dias, I.E. Chabu: "Analysis of broken rotor bars in large induction motors", Exacta, Vol. 4, No. 2, Centro Universitario Nove de Julho, Sao Paulo, Brasil, Jul./Dez. 2006.
- [46.] 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.
- [47.] J. Pons-Llinares, V. Climente-Alarcón, R. Puche-Panadero, J.A. Antonino-Daviu: "Bar breakage detection on Squirrel Cage Induction Motors via Transient Motor Current Signal Analysis based on the Wavelet Transform. A Review", web: <http://www.aedie.org/11chlie-papers/267-Pons.pdf>.
- [48.] N. Mehala, R. Dahiya: "Rotor Faults Detection in Induction Motor by Wavelet Analysis", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 1, No. 3, 2009.
- [49.] S.K. Ahamed, S. Karmakar, A. Sarkar, M. Mitra, S. Sengupta: "Diagnosis of Broken Rotor Bar Fault of Induction Motor through Envelope Analysis of Motor Startup Current using Hilbert and Wavelet Transform", Innovative Systems Design and Engineering, Vol. 2, No. 4, 2011.
- [50.] N. Mehala, R. Dahiya: "An Approach of Condition Monitoring of Induction Motor Using MCSA", International Journal of Systems Applications, Engineering and Development, Vol. 1, No. 1, 2007.

- [51.] G.A. Jimenez, A.O. Munoz, M.A. Duarte-Mermoud: "Fault detection in induction motors using Hilbert and Wavelet transforms", *Electrical Engineering*, Vol. 89, Springer-Verlag, 2007.
- [52.] N. Mehala, R. Dahiya: "Condition monitoring methods, failure identification and analysis for Induction machines", *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, Vol. 3, No. 1, 2009.
- [53.] Z. Ye, B. Wu, A. Sadeghian: "Current Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition", *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 50, No.6, December 2003.
- [54.] H. Douglas, P. Pillay, A. Ziarani: "Detection of broken rotor bars in induction motors using wavelet analysis", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*, June 2003.
- [55.] T. Vaimann, A. Kallasteouglas: "Detection of broken rotor bars in three-phase squirrel-cage induction motor using fast Fourier transform", *10th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering"*, Pärnu, Estonia, January 2011.
- [56.] H. Arabacı, O. Bilgin: "Detection of Rotor Bar Faults by Using Stator Current Envelope", *Proceedings of the World Congress on Engineering, WCE 2011*, London, U.K., July 2011.
- [57.] J. Faiz, M. Ojaghi: "Different indexes for eccentricity faults diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motors: A review", *Elsevier, Journal of Mechatronics* Vol. 19, 2009.
- [58.] M. Sahraoui, A. Ghoggal, S.E. Zouzou, M.E. Benbouzid: "Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors – Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents", *Elsevier, Simulation, Modelling, Practice and Theory*, Vol. 16, August 2008.
- [59.] L. Szabo, J.B. Dobai, K.Á. Biro: "Discrete Wavelet Transform Based Rotor Faults Detection Method for Induction Machines", URL: <http://bavaria.utcluj.ro/~szabol/Papers/UBooks.pdf>.
- [60.] G.F. Bin, J.J. Gao, X.J. Li, B.S. Dhillon: "Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets – Empirical mode decomposition feature extraction and neural network", *Elsevier, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.27, 2012.

- [61.] S.A.S. Al Kazzaz, G.K. Singh: "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques", Elsevier, Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 65, 2003.
- [62.] K.S. Gaeid, H.W. Ping, M. Khalid, A.L. Salih: "Fault Diagnosis of Induction Motor Using MCSA and FFT", Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 1, No. 2, 2011.
- [63.] J. Faiz, B.M. Ebrahimi, B. Akin, H.A. Toliyat: "Finite-Element Transient Analysis of Induction Motors Under Mixed Eccentricity Fault", IEEE transactions on magnetics, Vol. 44, No. 1, January 2008.
- [64.] D. Basak, A. Tiwari, S.P. Das: "Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines – A Review", IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2006, December 2006.
- [65.] A.M. da Silva: "Induction motor fault diagnostic and monitoring methods", Master Thesis, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, May 2006.
- [66.] W.T. Thomson, R.J. Gilmore: "Motor current signature analysis to detect faults in induction drives – fundamentals, data interpretation and industrial case histories", Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium, 2003.
- [67.] V.V. Thomas, K. Vasudevan, V.J. Kumar: "Online Cage Rotor Fault Detection Using Air-Gap Torque Spectra", IEEE transactions on energy conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003.
- [68.] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas: "Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques", IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 47, No.5, October 2000.
- [69.] L. Szabo, E. Kovacs, F. Toth, G. Fekete, J.B. Dobai: "Rotor Faults Detection Method for Squirrel Cage Induction Machines Based On the Park's Vector Approach", URL: <http://memm.utcluj.ro/szabol/Oradea2007.pdf>, 2007.
- [70.] 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.
- [71.] M. Media, F. Martin, A. Craciunescu, G. Ciumbulea, A. Rodriguez: "Induction Motor's Broken Bar Detection by using Stockwell Transform", SPEEDAM 2012,

- International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italia, June 2012.
- [72.] R. Puche-Panadero, V. Sarkimaki, P. Rodriguez: "Detection of broken rotor bar fault in induction machine fed by frequency converter", SPEEDAM 2012, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italia, June 2012.
- [73.] J. Zarei, J. Poshtan: "An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection", Elsevier, Journal of Tribology International, Vol.42, 2009.
- [74.] G. Petrović, M. Jadrić, M. Despalatović: "Detection of Broken Rotor Bar in Squirrel-Cage Induction Machines Using Stator Zero-Components", ICEM 2010, XIXth International Conference on Electrical Machines, Rome, Italia, September 2010.
- [75.] G.G. Acosta, C.J. Verucchi, E.R. Gelso: "A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors", Elsevier, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.20, 2006.
- [76.] D. Miljković: "Brief Review of Motor Current Signature Analysis", HDKBR Info Magazin, Vol.5, No.1, June 2015.
- [77.] R. Kechida, A. Menacer, H. Talhaoui, H. Cherif: "Discrete Wavelet Transform for Stator Fault Detection in Induction Motors", SDEMPED 2015, 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Guarda, Portugal, September 1-4, 2015.
- [78.] C.S. Kalaskar, V.J. Gond: "Motor Current Signature Analysis to Detect the Fault in Induction Motor", International Journal of Engineering Research and Applications, Vol.4, Issue 6, June 2014.
- [79.] V. Kindl, K. Hruska, J. Sobra, M. Byrtus: "Effect of Induction Machine's Load and Rotor Eccentricity on Space Harmonics in the Air Gap Magnetic Flux Density", 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014, Brno, Czech Republic, December 3-5, 2014.
- [80.] D.G. Dorrell, A. Salah: "Detection of Rotor Eccentricity in Wound Rotor Induction Machines Using Pole-Specific Search Coils", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 11, November 2015.

- [81.] 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.
- [82.] 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
- [83.] D. Lopez-Perez, J. Antonino-Daviu: "Application of Infrared Thermography to Failure Detection in Industrial Induction Motors: Case Stories", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No.3, May/June 2017.
- [84.] J. Martinez, A. Belachen, A. Muetze: "Analysis of the Vibration Magnitude of an Induction Motor With Different Numbers of Broken Bars", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No.3, May/June 2017.
- [85.] I. Ishkova, O. Vitek: "Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis", 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 20-22 May 2015.
- [86.] 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.
- [87.] E. Houssin, E. Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, J.A. Antonino-Daviu: "Stator Current Demodulation for Induction Machine Rotor Faults Diagnosis", First International Conference on Green Energy ICGE, Sfax, Tunisia, 25-27 March 2014.
- [88.] H. Singh, M. Seera, M.Z. Abdullah: "Detection and Diagnosis of Broken Rotor Bars and Eccentricity Faults in Induction Motors Using the Fuzzy Min-Max Neural Network", International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Dallas, TX, USA, 4-9 August 2013.
- [89.] J. Sobra, V. Kindl, B. Skala: "Determination of the Force Caused by Broken Rotor Bar and Static Eccentricity in an Induction Machine", ELEKTRO, Rajecké Teplice, Slovakia, 19-20 May 2014.
- [90.] A. Seghiour, T. Seghier, B. Zegnini: "Diagnostic of the Simultaneous of Dynamic Eccentricity and Broken Rotor Bars Using the Magnetic Field Spectrum of the air-gap for an Induction Machine", 3rd International Conference on Control,

- Engineering & Information Technology (CEIT), Tlemcen, Algeria, 25-27 May 2015.
- [91.] Z. Haznadar, Ž. Štih: "Elektromagnetizam I, II", Školska knjiga, Zagreb, Hrvatska, 1997.
- [92.] V. Bego: "Mjerenja u elektrotehnici", Graphis, Zagreb, Hrvatska, 2003.
- [93.] JCGM 100:2008: "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement", September 2008.
- [94.] S. Jadhav: "Impact of Faults on the Efficiency of Squirrel Cage Induction Motor", International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), Navi Mumbai, India, 27-28 January 2017.
- [95.] Znanstveni projekt KONČAR – Instituta za elektrotehniku prijavljen MZOŠ-u: "Ekspertni sustav monitoringa namota rotacijskih strojeva", Klasa: 641-01/11-05/00078.
- [96.] S. Tvorčić: "Otkrivanje puknuća štapa i ekscentriciteta asinkronoga kaveznog motora analizom magnetske indukcije u zračnom rasporu", Kvalifikacijski doktorski ispit, FER, Zagreb, Ožujak 2013.
- [97.] Z. Haznadar: "Teorijska elektrotehnika: Elektromagnetska teorija i polja", Element, Zagreb, 2001.
- [98.] 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.

## Popis oznaka

|                |                                                                           |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $f_v$          | frekvencija vibracije                                                     |
| $f_r$          | frekvencija rotacije                                                      |
| $N$            | broj kuglica                                                              |
| $b_d$          | promjer kuglice                                                           |
| $d_p$          | promjer koraka kuglice ležaja                                             |
| $\beta$        | kut kontakta kuglice sa stazom                                            |
| $s$            | klizanje                                                                  |
| $f_i$          | frekvencija napajanja                                                     |
| $p$            | broj pari polova                                                          |
| $f_{brb}$      | frekvencija harmonika izražena kod prekid štapa rotora                    |
| $f_{st}$       | frekvencija harmonika izražena kod međuzavojnih kvarova statorskog namota |
| $f_{bng}$      | frekvencija harmonika izražena kod oštećenja ležaja                       |
| $f_{ecc}$      | frekvencija harmonika izražena kod pojave ekscentriciteta                 |
| $f_v$          | specifična frekvencija vibracija                                          |
| $N_r$          | broj štapova rotora                                                       |
| $n_d$          | red ekscentriciteta                                                       |
| $v$            | red statorskih vremenskih harmonika koji su prisutni u napajanju motora   |
| $\delta$       | širina zračnog raspora                                                    |
| $U$            | napon napajanja motora                                                    |
| $f$            | frekvencija napajanja motora                                              |
| $t_{sim}$      | vrijeme simulacijskog proračuna                                           |
| $t_{sim.kr.}$  | vremenski korak simulacijskog proračuna                                   |
| $\Delta\delta$ | promjena širine zračnog raspora                                           |
| $U_n$          | nazivni napon motora                                                      |
| $I$            | struja motora                                                             |
| $P$            | snaga motora                                                              |
| $\cos\varphi$  | faktor snage motora                                                       |
| $B$            | gustoća magnetske indukcije                                               |
| $\tau_p$       | polni korak motora                                                        |
| $x$            | horizontalna koordinatna os                                               |
| $y$            | vertikalna koordinatna os                                                 |
| $\Delta t$     | vremenski interval                                                        |

|                          |                                                                                                                                   |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Ms1$                    | 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                                                                                                           |
| $MSD1$                   | dodatni mjerni svitak broj jedan                                                                                                  |
| $MSD2$                   | dodatni mjerni svitak broj dva                                                                                                    |
| $\Delta U_{Ms1/Ms3}$     | postotna promjena napona mjernih svitaka 1 i 3                                                                                    |
| $\Delta U_{Ms2/Ms4}$     | postotna promjena napona mjernih svitaka 2 i 4                                                                                    |
| $\Delta U_{max,Ms1/Ms3}$ | postotna promjena maksimalne vrijednosti razlike napona mjernih svitaka 1 i 3                                                     |
| $\Delta U_{ef,Ms1/Ms3}$  | postotna promjena efektivne vrijednosti razlike napona mjernih svitaka 1 i 3                                                      |
| $\Delta U_{max,Ms2/Ms4}$ | postotna promjena maksimalne vrijednosti razlike napona mjernih svitaka 2 i 4                                                     |
| $\Delta U_{ef,Ms2/Ms4}$  | postotna promjena efektivne vrijednosti razlike napona mjernih svitaka 2 i 4                                                      |
| $THL$                    | oznaka granice praga napona u dijagramu toka algoritma                                                                            |
| $THL\_EKSC$              | oznaka granice dozvoljenog odstupanja kod pojave statičkog ekscentriciteta u dijagramu toka algoritma                             |
| $t_{period}$             | vrijeme potrebno za jedan okret rotora                                                                                            |
| $t_{1pr}$                | vrijeme pojave prvog ekstremnog porasta napona u razlici napona dobivenoj za prekid prstena rotora                                |
| $t_{2pr}$                | vrijeme pojave drugog ekstremnog porasta napona u razlici napona dobivenoj za prekid prstena rotora                               |
| $t_{3pr}$                | vrijeme pojave trećeg ekstremnog porasta napona u razlici napona dobivenoj za prekid prstena rotora                               |
| $t_{4pr}$                | vrijeme pojave četvrtog ekstremnog porasta napona u razlici napona dobivenoj za prekid prstena rotora                             |
| $\Delta t_{pr}$          | vremenska razlika pojavljivanja ekstremnih porasta napona u razlici napona dobivenoj za prekid prstena rotora                     |
| $y$                      | predstavlja razliku induciranih napona mjernih svitaka udaljenih za $2\tau_p$ – varijabla u algoritmu za detekciju prekida kaveza |
| $nr$                     | broj rotorskih štapova motora                                                                                                     |

|                          |                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $dt$                     | razmak svake točke u uzorkovanju signala – u algoritmu za detekciju prekida kaveza                                                                                                                       |
| $dp$                     | varijabla u algoritmu za detekciju prekida kaveza koja označava kolika je postotna razlika između impulsa napona koji su posljedica kvara od onih impulsa koji to nisu u učitanoj signalu razlike napona |
| $\Delta t_{\text{stop}}$ | vremensko trajanje kojim se reprezentira jedan štap u učitanoj signalu razlike napona dvaju svitaka (dio algoritma za detekciju prekida kaveza)                                                          |
| $\Delta Ms13$            | razlika napona mjernih svitaka 1 i 3                                                                                                                                                                     |
| $\text{diff\_}Ms13$      | odstupanje između efektivnih vrijednosti napona mjernih svitaka 1 i 3                                                                                                                                    |
| $\text{diff\_}Ms24$      | odstupanje između efektivnih vrijednosti napona mjernih svitaka 2 i 4                                                                                                                                    |
| $U_{\text{ef\_}}Ms1$     | efektivna vrijednost napona mjernog svitka 1                                                                                                                                                             |
| $U_{\text{ef\_}}Ms2$     | efektivna vrijednost napona mjernog svitka 2                                                                                                                                                             |
| $U_{\text{ef\_}}Ms3$     | efektivna vrijednost napona mjernog svitka 3                                                                                                                                                             |
| $U_{\text{ef\_}}Ms4$     | efektivna vrijednost napona mjernog svitka 4                                                                                                                                                             |

## Popis slika

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2.1 Raspodjela kvarova po glavnim komponentama motora .....                                                                                                                                                                                                            | 4  |
| Slika 2.2 Vrste kvarova asinkronog motora .....                                                                                                                                                                                                                              | 4  |
| Slika 2.3 Vrste ekscentričnog pomaka rotora.....                                                                                                                                                                                                                             | 8  |
| Slika 2.4 Ekscentricitet: a) statički; b) dinamički.....                                                                                                                                                                                                                     | 9  |
| Slika 2.5 Frekvencijski spektar struje s izraženim bočnim harmonicima kod prekida jednog štapa [25] .....                                                                                                                                                                    | 12 |
| Slika 3.1 Tramvajski vučni motor .....                                                                                                                                                                                                                                       | 14 |
| Slika 3.2 Model i presjek asinkronoga kaveznog motora s prikazom glavnih komponenti .....                                                                                                                                                                                    | 15 |
| Slika 3.3 Utor statora motora s dvoslojnim namotom sa svicima izrađenim od profilne žice: 1 – statorski paket, 2 – utorski oblog, 3 – izolacija vodiča, 4 – izolacija dionog vodiča, 5 – dioni vodič, 6 – vodič, 7 – međuslojna izolacija, 8 – svitak namota, 9 – klin ..... | 17 |
| Slika 3.4 Shema namota statora.....                                                                                                                                                                                                                                          | 18 |
| Slika 3.5 Izvedba kaveznog namota rotora pogodna za simuliranje oštećenja štapa i prstena.....                                                                                                                                                                               | 19 |
| Slika 3.6 Ležajni štitovi konstruirani za simuliranje ekscentriciteta .....                                                                                                                                                                                                  | 20 |
| Slika 3.7 Principijelna shema mjernog sustava .....                                                                                                                                                                                                                          | 21 |
| Slika 3.8 Definicija elektromagnetske indukcije.....                                                                                                                                                                                                                         | 22 |
| Slika 3.9 Mjerni svitak izrađen u PCB tehnologiji.....                                                                                                                                                                                                                       | 23 |
| Slika 3.10 Mjerni svitak ugrađen na zub statora .....                                                                                                                                                                                                                        | 23 |
| Slika 3.11 Induktivni senzor: 1 – jezgra sa zavojnicom, 2 – elektroničko sklopovlje .....                                                                                                                                                                                    | 24 |
| Slika 3.12 Prikaz ugradnje induktivnih senzora: 1 – nosač senzora za mjerenje u $y$ – osi, 2 – induktivni senzor, 3 – pomoćni dio za mjerenje u $x$ – osi, 4 – nosač senzora za mjerenje u $x$ – osi, 5 – induktivni senzor .....                                            | 25 |
| Slika 3.13 Izlazna karakteristika induktivnog senzora relativnog pomaka .....                                                                                                                                                                                                | 25 |
| Slika 3.14 Mjerna laboratorijska stanica DEWE 2522.....                                                                                                                                                                                                                      | 26 |
| Slika 3.15 Programsko okruženje programa <i>DEWESOFT</i> .....                                                                                                                                                                                                               | 26 |
| Slika 4.1 Princip i način ugradnje mjernih svitaka za diferencijalno mjerenje magnetskog polja na električni izmjenični rotacijski stroj [6].....                                                                                                                            | 32 |
| Slika 4.2 Način spajanja mjernih svitaka čija je međusobna udaljenost neparni višekratnik polnog koraka .....                                                                                                                                                                | 33 |
| Slika 4.3 Način spajanja mjernih svitaka čija je međusobna udaljenost parni višekratnik polnog koraka .....                                                                                                                                                                  | 34 |
| Slika 4.4 Raspodjela magnetskog polja u četveropolnom rotacijskom izmjeničnom stroju .....                                                                                                                                                                                   | 35 |
| Slika 4.5 Valni oblik napona izmjeren na krajevima svakog od mjernih svitaka zasebno, uz prekinut jedan štap rotorskog kaveza.....                                                                                                                                           | 36 |
| Slika 4.6 Valni oblik napona izmjeren na krajevima dva serijski spojena mjerna svitka, uz prekinut jedan štap kaveza motora .....                                                                                                                                            | 36 |
| Slika 4.7 Mjerni svici za diferencijalno mjerenje magnetskog polja ugrađeni na zube statora asinkronog motora .....                                                                                                                                                          | 37 |
| Slika 5.1 Dvodimenzionalni model motora u programskom okruženju <i>MagNet</i> .....                                                                                                                                                                                          | 41 |
| Slika 5.2 Mreža konačnih elemenata proračunskog modela .....                                                                                                                                                                                                                 | 41 |
| Slika 5.3 Spoj vanjskog kruga i modela motora.....                                                                                                                                                                                                                           | 42 |
| Slika 5.4 Raspodjela gustoće magnetskog toka asinkronog motora u ispravnom stanju .....                                                                                                                                                                                      | 43 |
| Slika 5.5 Pozicije mjernih svitaka Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 za otkrivanje kvarova u modelu motora .....                                                                                                                                                                           | 44 |
| Slika 5.6 Valni oblik induciranih napona u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 u ispravnom stanju .....                                                                                                                                                                      | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 5.7 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ u ispravnom stanju .....                                                                                | 45 |
| Slika 5.8 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms2 prostorno razmaknutih za $\tau_p$ u ispravnom stanju .....                                                                                 | 46 |
| Slika 5.9 Razlika napona dobivena serijskim spajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms2 (prostorno razmaknutih za $\tau_p$ ) u ispravnom stanju.....                                                                    | 47 |
| Slika 5.10 Razlika napona dobivena serijskim spajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ ) u ispravnom stanju.....                                                                  | 47 |
| Slika 5.11 Raspored mjernih svitaka zajedno sa smjerovima i iznosima pomicanja rotora kod simulacije statičkog ekscentriciteta .....                                                                            | 49 |
| Slika 5.12 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)..... | 50 |
| Slika 5.13 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)..... | 51 |
| Slika 5.14 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %).....                               | 51 |
| Slika 5.15 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)..... | 52 |
| Slika 5.16 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)..... | 53 |
| Slika 5.17 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %).....                               | 53 |
| Slika 5.18 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)..... | 54 |
| Slika 5.19 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog raspora (pomak u smjeru + y osi)..... | 55 |
| Slika 5.20 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %).....                               | 55 |
| Slika 5.21 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru – y osi)..... | 56 |
| Slika 5.22 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog raspora (pomak u smjeru – y osi)..... | 57 |
| Slika 5.23 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %).....                               | 57 |
| Slika 5.24 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru – y osi)..... | 58 |
| Slika 5.25 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog raspora (pomak u smjeru – y osi)..... | 59 |

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 5.26 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %).....                                 | 59 |
| Slika 5.27 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – y osi)..... | 60 |
| Slika 5.28 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – y osi)..... | 61 |
| Slika 5.29 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %).....                                 | 61 |
| Slika 5.30 Promjena efektivne vrijednosti induciranih napona u Ms1 i Ms3 uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta.....                                         | 64 |
| Slika 5.31 Promjena efektivne vrijednosti induciranih napona u Ms2 i Ms4 uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta.....                                         | 65 |
| Slika 5.32 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru + x osi)..... | 66 |
| Slika 5.33 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru + x osi)..... | 66 |
| Slika 5.34 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %).....                                 | 67 |
| Slika 5.35 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru + x osi)..... | 68 |
| Slika 5.36 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru + x osi)..... | 68 |
| Slika 5.37 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %).....                                 | 69 |
| Slika 5.38 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru + x osi)..... | 70 |
| Slika 5.39 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru + x osi)..... | 70 |
| Slika 5.40 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %).....                                 | 71 |
| Slika 5.41 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – x osi)..... | 72 |
| Slika 5.42 Usporedba valnih oblika induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 15 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – x osi)..... | 72 |
| Slika 5.43 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 15 %).....                                 | 73 |

|                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 5.44 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – $x$ osi).....                     | 74 |
| Slika 5.45 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 20 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – $x$ osi).....                     | 74 |
| Slika 5.46 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 20 %).....                                                       | 75 |
| Slika 5.47 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – $x$ osi).....                     | 76 |
| Slika 5.48 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod iznosa statičkog ekscentriciteta od 25 % zračnog rasporeda (pomak u smjeru – $x$ osi).....                     | 76 |
| Slika 5.49 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (statički ekscentricitet od 25 %).....                                                       | 77 |
| Slika 5.50 Usporedba promjene efektivne vrijednosti induciranog napona u Ms2 i Ms4 uslijed pomicanja rotora u horizontalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta.....                                                   | 79 |
| Slika 5.51 Usporedba promjene efektivne vrijednosti induciranog napona u Ms1 i Ms3 uslijed pomicanja rotora u horizontalnom smjeru za različite iznose statičkog ekscentriciteta.....                                                   | 80 |
| Slika 5.52 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod prekida jednog štapa kaveza rotora .....                                                                                   | 81 |
| Slika 5.53 Razlika napona dobivena serijskim protuspajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ ) kod prekida jednog štapa kaveza rotora.....                                                                 | 81 |
| Slika 5.54 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod prekida dva štapa kaveza rotora.....                                                                                       | 82 |
| Slika 5.55 Razlika napona dobivena serijskim protuspajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ ) kod prekida dva štapa kaveza rotora.....                                                                    | 83 |
| Slika 5.56 Valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod prekida dva susjedna štapa kaveza rotora.....                                                                              | 84 |
| Slika 5.57 Razlika napona dobivena serijskim protuspajanjem mjernih svitaka Ms1 i Ms3 (prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ ) kod prekida dva susjedna štapa kaveza rotora .....                                                          | 84 |
| Slika 5.58 Shema spoja kaveznog namota – mjesto prekida prstena .....                                                                                                                                                                   | 86 |
| Slika 5.59 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod prekida prstena kaveznog namota .....                                                                          | 86 |
| Slika 5.60 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (prekid prstena kaveznog namota) .....                                                       | 87 |
| Slika 5.61 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod kombinacije dvaju kvarova rotora – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 %.....                         | 88 |
| Slika 5.62 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje (kod kombinacije dvaju kvarova rotora – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 %)..... | 89 |
| Slika 5.63 Usporedba valnih oblika induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ kod kombinacije dvaju kvarova rotora – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 %.....                         | 90 |
| Slika 5.64 Usporedba razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ za ispravno i kvarno stanje – prekid štapa i statički ekscentricitet od 25 % .....                                       | 90 |

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 6.1 Principijelna shema spoja: 1 – izmjenični motor, 2 – sinkroni generator, 3 – ispitivani objekt (asinkroni motor), 4 – opteretni stroj (dinamovaga) .....                                             | 92  |
| Slika 6.2 Model ispitnog poligona s asinkronim motorom (ispitni objekt) i dinamovagom (opteretni stroj) .....                                                                                                  | 92  |
| Slika 6.3 Mjerni svitak za detekciju kvara izrađen u PCB tehnologiji .....                                                                                                                                     | 93  |
| Slika 6.4 Mjerni svici ugrađeni u zračni raspored motora .....                                                                                                                                                 | 94  |
| Slika 6.5 Raspored i pozicije ugrađenih mjernih svitaka po obodu motora .....                                                                                                                                  | 94  |
| Slika 6.6 Izmjereni valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms1, Ms2, Ms3 i Ms4 u ispravnom stanju kod struje motora $I_n = 136 \text{ A}$ .....                                                      | 96  |
| Slika 6.7 Izmjereni valni oblik induciranog napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 u ispravnom stanju kod struje motora $I_n = 136 \text{ A}$ .....                                                      | 96  |
| Slika 6.8 Razlika izmjerenih napona u svicima Ms1 i Ms3 – oduzimanje na dvostrukom polnom koraku, $2\tau_p$ kod struje motora $I_n = 136 \text{ A}$ .....                                                      | 97  |
| Slika 6.9 Razlika izmjerenih napona u svicima Ms1 i Ms2 – oduzimanje na polnom koraku, $\tau_p$ kod struje motora $I_n = 136 \text{ A}$ .....                                                                  | 97  |
| Slika 6.10 Smjerovi pomicanja rotora s ciljem izazivanja statičkog ekscentriciteta .....                                                                                                                       | 99  |
| Slika 6.11 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + y osi .....                                                    | 101 |
| Slika 6.12 Usporedba izmjerenog induciranog napona u mjernom svitku Ms1 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 25 % te pomaka rotora u smjeru + y osi .....                                     | 101 |
| Slika 6.13 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 na $2\tau_p$ za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 25 % (pomak u smjeru + y osi) ..... | 102 |
| Slika 6.14 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + y osi .....                                                    | 102 |
| Slika 6.15 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + y osi .....                                          | 103 |
| Slika 6.16 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 30 % i pomaka rotora u smjeru – y osi .....                                                    | 104 |
| Slika 6.17 Usporedba izmjerenog induciranog napona u mjernom svitku Ms3 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 30 % te pomaka rotora u smjeru – y osi .....                                     | 104 |
| Slika 6.18 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 na $2\tau_p$ za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 30 % (pomak u smjeru – y osi) ..... | 105 |
| Slika 6.19 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 30 % i pomaka rotora u smjeru – y osi .....                                                    | 105 |
| Slika 6.20 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 30 % i pomaka rotora u smjeru – y osi .....                                          | 106 |
| Slika 6.21 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenog induciranog napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru .....                                          | 108 |
| Slika 6.22 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenog induciranog napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru .....                                | 108 |
| Slika 6.23 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenog induciranog napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru .....                                          | 109 |
| Slika 6.24 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + x osi .....                                                    | 110 |
| Slika 6.25 Usporedba izmjerenog induciranog napona u mjernom svitku Ms2 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 25 % te pomaka rotora u smjeru + x osi .....                                     | 110 |
| Slika 6.26 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 na $2\tau_p$ za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 25 % (pomak u smjeru + x osi) ..... | 111 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 6.27 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + $x$ osi .....                                                    | 111 |
| Slika 6.28 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 25 % i pomaka rotora u smjeru + $x$ osi .....                                          | 112 |
| Slika 6.29 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod statičkog ekscentriciteta od 35 % i pomaka rotora u smjeru – $x$ osi .....                                                    | 113 |
| Slika 6.30 Usporedba izmjerenog induciranih napona u mjernom svitku Ms4 za ispravno stanje i kod statičkog ekscentriciteta od 35 % te pomaka rotora u smjeru – $x$ osi .....                                     | 113 |
| Slika 6.31 Usporedba napona dobivena oduzimanjem izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 na $2\tau_p$ za ispravno stanje i za statički ekscentricitet od 35 % (pomak u smjeru – $x$ osi) ..... | 114 |
| Slika 6.32 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod statičkog ekscentriciteta od 35 % i pomaka rotora u smjeru – $x$ osi .....                                                    | 114 |
| Slika 6.33 Usporedba izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 kod statičkog ekscentriciteta od 35 % i pomaka rotora u smjeru – $x$ osi .....                                          | 115 |
| Slika 6.34 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru .....                                         | 117 |
| Slika 6.35 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranih napona u mjernim svicima MSD1 i MSD2 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru .....                                       | 117 |
| Slika 6.36 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranih napona u mjernim svicima Ms5, Ms6, Ms7 i Ms8 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru .....                               | 118 |
| Slika 6.37 Promjena efektivne vrijednosti izmjerenoga induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru .....                                         | 118 |
| Slika 6.38 Mjesto na kaveznom namotu gdje je prekinut jedan štap rotora – područje tik uz prsten .....                                                                                                           | 119 |
| Slika 6.39 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod prekida jednog štapa rotora .....                                                                                             | 120 |
| Slika 6.40 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ispravnom stanju i kod prekida jednog štapa rotora .....                                                         | 121 |
| Slika 6.41 Mjesto na kaveznom namotu gdje su prekinuta dva štapa rotora – područje tik uz prsten .....                                                                                                           | 121 |
| Slika 6.42 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms3 kod prekida dva štapa rotora .....                                                                                                | 122 |
| Slika 6.43 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ispravnom stanju i kod prekida dva štapa rotora .....                                                            | 123 |
| Slika 6.44 Kavezni namot – mjesto prekida prstena rotora .....                                                                                                                                                   | 124 |
| Slika 6.45 Usporedba izmjerenih napona induciranih u svicima Ms1 i Ms3 kod prekida prstena .....                                                                                                                 | 124 |
| Slika 6.46 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 u ispravnom stanju i kod prekida prstena rotora .....                                                              | 125 |
| Slika 6.47 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms2 i Ms4 kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 % .....                                                     | 126 |
| Slika 6.48 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms2 i Ms4 u ispravnom stanju te kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 % .....                | 126 |
| Slika 6.49 Usporedba izmjerenih napona induciranih u mjernim svicima Ms1 i Ms2 kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 % .....                                                     | 127 |
| Slika 6.50 Usporedba razlike napona izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms2 u ispravnom stanju te kod prekida jednog štapa rotora i statičkog ekscentriciteta iznosa 30 % .....                | 128 |
| Slika 7.1 Usporedba napona induciranih u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida jednog štapa rotora .....                                                                           | 130 |
| Slika 7.2 Usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida jednog štapa rotora .....                                                                                  | 130 |

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 7.3 Usporedba napona induciranog u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida dva štapa rotora .....                                                             | 131 |
| Slika 7.4 Usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida dva štapa rotora .....                                                                    | 132 |
| Slika 7.5 Usporedba napona induciranog u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida prstena rotora.....                                                                | 133 |
| Slika 7.6 Usporedba razlike napona svitaka Ms1 i Ms3 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod prekida prstena rotora .....                                                                      | 133 |
| Slika 7.7 Usporedba napona induciranog u mjernom svitku Ms1 dobivenog MKE proračunom i mjerenjem kod statičkog ekscentriciteta iznosa 25 %.....                                                 | 134 |
| Slika 8.1 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida jednog štapa rotora .....                                            | 137 |
| Slika 8.2 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida dva štapa rotora .....                                               | 137 |
| Slika 8.3 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida dva susjedna štapa rotora .....                                      | 138 |
| Slika 8.4 Svojstvena karakteristika u valnom obliku napona dobivenog spajanjem u protuspoj dvaju svitaka za slučaj prekida prstena kaveznog rotora.....                                         | 139 |
| Slika 8.5 Svojstvena karakteristika povećanja induciranog napona u jednom od mjernih svitaka kod pojave statičkog ekscentriciteta od 25% zračnog rasporeda .....                                | 141 |
| Slika 8.6 Svojstveni valni oblik razlike induciranih napona u mjernim svicima Ms1 i Ms3 prostorno razmaknutih za $2\tau_p$ u ispravnom stanju i za iznos statičkog ekscentriciteta od 25% ..... | 141 |
| Slika 8.7 Dijagram toka algoritma za prepoznavanje kvara rotora asinkronog motora .....                                                                                                         | 143 |
| Slika 8.8 Primjer ulaznog signal $y$ na temelju kojeg funkcija <i>findpeaksandthreshhold</i> određuje prag i vrhove napona .....                                                                | 145 |
| Slika 8.9 Ulazni signal $y$ – sve učitane vrijednosti pretvorene u apsolutne .....                                                                                                              | 146 |
| Slika 8.10 Učitani signal $y$ – određeni svi vrhovi napona .....                                                                                                                                | 146 |
| Slika 8.11 Učitani signal $y$ – funkcijom <i>findpeakandthreshhold</i> određen prag i vrhovi napona .....                                                                                       | 149 |
| Slika 8.12 Ispis algoritma kod krivo postavljene vrijednosti varijable $dp$ (za $dp = 17,74\%$ ) .....                                                                                          | 150 |
| Slika 8.13 Ispis algoritma za ispravno stanje kod ispravno postavljene vrijednosti varijable $dp$ .....                                                                                         | 151 |
| Slika 8.14 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje prekida kaveza – detekcija prekida jednog štapa.....                                                                                        | 152 |
| Slika 8.15 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje prekida kaveza – detekcija prekida dva štapa.....                                                                                           | 153 |
| Slika 8.16 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje prekida kaveza – detekcija prekida prstena.....                                                                                             | 154 |
| Slika 8.17 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – ispravno stanje.....                                                                 | 158 |
| Slika 8.18 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – ispravno stanje.....                                                                 | 158 |
| Slika 8.19 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru $+x$ za 25 % .....                                             | 159 |
| Slika 8.20 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru $+x$ za 25 % .....                                             | 159 |
| Slika 8.21 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru $-x$ za 35 % .....                                             | 160 |
| Slika 8.22 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru $-x$ za 35 % .....                                             | 160 |
| Slika 8.23 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru $+y$ za 20 % .....                                             | 161 |

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 8.24 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru + y za 20 % ..... | 161 |
| Slika 8.25 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms1 i Ms3 – pomak rotora u smjeru – y za 30 % ..... | 162 |
| Slika 8.26 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta za mjerne svitke Ms2 i Ms4 – pomak rotora u smjeru – y za 30 % ..... | 162 |
| Slika 8.27 Grafički prikaz rezultata algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta – detekcija statičkog ekscentriciteta.....                  | 163 |
| Slika 8.28 Grafički prikaz rezultata algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta – detekcija statičkog ekscentriciteta.....                  | 163 |

## Popis tablica

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablica 3.1 Projektni podaci asinkronog motora za pogon tramvaja .....                                                                                                                                          | 16  |
| Tablica 3.2 Dimenzije i oblik statorskih i rotorskih utora .....                                                                                                                                                | 17  |
| Tablica 3.3 Tehničke specifikacije mjerne stanice 2522 preuzete iz kataloga proizvođača.....                                                                                                                    | 27  |
| Tablica 3.4 Mjerna nesigurnost mjerne stanice .....                                                                                                                                                             | 29  |
| Tablica 3.5 Mjerna nesigurnost univerzalnog instrumenta .....                                                                                                                                                   | 29  |
| Tablica 3.6 Mjerna nesigurnost cjelokupnoga eksperimentalnog mjerenja .....                                                                                                                                     | 30  |
| Tablica 5.1 Uvjeti simulacijskog proračuna.....                                                                                                                                                                 | 40  |
| Tablica 5.2 Pregled računatih ispravnih i kvarnih pogonskih stanja asinkronog motora.....                                                                                                                       | 42  |
| Tablica 5.3 Efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru dobivene MKE proračunom.....                                                               | 63  |
| Tablica 5.4 Maksimalna i efektivna vrijednost razlike napona dobivena spajanjem u protuspoj mjernih svitaka Ms1 i Ms3 uslijed pomicanja rotora u vertikalnom smjeru za različite iznose ekscentriciteta.        | 64  |
| Tablica 5.5 Efektivne vrijednosti induciranih napona u mjernim svicima uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru dobivene MKE proračunom.....                                               | 78  |
| Tablica 5.6 Maksimalna i efektivna vrijednost razlike napona dobivena spajanjem u protuspoj mjernih svitaka Ms2 i Ms4 uslijed pomicanja rotora u horizontalnom smjeru za različite iznose ekscentriciteta ..... | 79  |
| Tablica 6.1 Nazivni podaci opteretnog stroja – dinamovage .....                                                                                                                                                 | 93  |
| Tablica 6.2 Efektivne vrijednosti izmjerenih napona u svicima kod struje motora $I_n = 136$ A – rotor u centru .....                                                                                            | 98  |
| Tablica 6.3 Efektivne vrijednosti izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u vertikalnom smjeru .....                                                             | 107 |
| Tablica 6.4 Efektivne vrijednosti izmjerenih induciranih napona u mjernim svicima uslijed kontinuiranog pomicanja rotora u horizontalnom smjeru .....                                                           | 116 |
| Tablica 6.5 Uvjeti kod mjerenja na motoru s prekinutim jednim štapom rotora .....                                                                                                                               | 119 |
| Tablica 8.1 Vrijednost vrhova napona određenih unutar signala $y$ .....                                                                                                                                         | 147 |
| Tablica 8.2 Vrijednost vrhova napona unutar signala $y$ – poredak od najvećeg prema najmanjem .....                                                                                                             | 147 |

**Prilog A: Kôd algoritma za otkrivanje prekida kaveza rotora**

```
clc;
clear all;
%ime_datoteke = 'data_pprst.txt';
ime_datoteke = 'data_plsMJ.txt';
fs = fopen(ime_datoteke, 'r');
y = fscanf(fs, '%f');
fclose(fs);
counterStap = 0;
counterPrsten = 0;
frekvencija = 25;
period = 1/frekvencija;
period_ms = period*1000;
%time_sampling = 0.025;
time_sampling = 0.1;
br_tocaka = (period/time_sampling)*1000;
%t = 0:time_sampling:period_ms-0.025;
t = 0:time_sampling:period_ms-0.1;
prekid = false;
## broj stapova
nr = 28;
## razlika vremena izmedju vrijednosti delta T
%dt = 0.025;
dt = 0.1;
## napravi x-os
x = 0:dt:(length(y) * dt - dt);
## odredivanje thresholda
[treshold, pks, locs] = findpeaksandtreshold(y, nr, dt);
## iscrtaj vrhove i threshold
plot(x,y,'LineWidth',2); grid ON; hold ON;
scatter(locs,pks, "m", "s");
line([0,40],[treshold, treshold], "color", 'r','LineWidth',2);
line([0,40],[-treshold, -treshold], "color", 'r','LineWidth',2);
```

```
legend( '\DeltaMs13',"Peaks", "Threshold", "location", "northeast")
xlabel('Vrijeme [ms]');
ylabel('Napon [V]');
hold ON;
if length(pks) > 4 || length(pks) == 2
    legenda = 'PREKID STAPA'
    BrojPrekinutihStapova = length(pks)/2
    title ( {"Vrsta kvara:" legenda, "Broj prekinutih stapova:" BrojPrekinutihStapova})
elseif length(pks) == 4
    if ((locs(2) - locs(1)) / dt) > 50
        legenda = 'PREKID STAPA'
        BrojPrekinutihStapova = length(pks)/2
        title ( {"Vrsta kvara:" legenda, "Broj prekinutih stapova:" BrojPrekinutihStapova})
    else
        legenda = 'PREKID PRSTENA'
        title ( {"Vrsta kvara:" legenda})
    endif
elseif rem(length(pks),2) ~= 0
    legenda = 'SMETNJA SIGNALA'
    title ( {"Nema kvara rotora:" legenda})
else
    legenda = 'ISPRAVNO STANJE'
    title ( {"Nema kvara rotora:" legenda})
endif
hold OFF;
```

## **Prilog B: Kôd funkcije za određivanje praga napona i određivanje broja vrhova napona**

```
## funkcija za određivanje praga napona i broja vrhova napona
## y = polje signala
## nr = broj stapova
## dt = delta za razmak svake tocke u vremenu (ms)
## dp = postotak razlike u vrhovima za detekciju thresholda
function [threshold, peaks, loct] = findpeaksandthreshold(y, nr, dt, dp = 21)
    ## defaultna vrijednost, ako je ista vracena radi se o gresci!
    threshold = -1;
    peaks = [];
    loct = [];

    ## krivi broj argumenata
    if (nargin < 3)
        error("usage: findthreshold (vector, number_of_sticks, delta_time [,percentage difference, analogue difference])");
    endif

    ## nije predano polje podataka
    if (isvector(y) != 1 || length(y) < nr * 2)
        error("findthreshold expecting a vector (number_of_sticks * 2 length) as a first argument!");
    endif

    ## absdiff vraca absolutnu razliku vrijednosti u postotku
    function retval = absdiff(first, second)
        ## ukoliko je prvi broj 0, vrati Inf za rezultat
        ## inace izracunaj vrijednost u postotku
        if (first == 0)
            retval = Inf;
        else
            retval = (abs(first - second) / first) * 100;
        end
    end
```

```
        endif
    endfunction

    ## izracunaj broj podataka u spremniku (bin) za racunanje maksimuma
    ns_step = floor(length(y) / nr);
    ## minimalna udaljenost je pola od broja podataka u spremniku (bin)
    ns_step_bin = ceil(ns_step / 2);
    ## kako gledamo pola spremnika, trebamo dvostruko vise spremnika no stapova
    ns2 = 2 * ns_step_bin;

    valOfLargestPeakSoFar = 0;
    indexOfLargestPeakSoFar = 0;
    indexOfLastPeak = 0;
    valOfLastPeak = 0;

    y_peaks = [];
    x_peaks = [];
    x_times = [];
    y_times = [];

    ## nadji sve vrhove
    for i = 2:(length(y) - 1)
        valL = abs(y(i - 1));
        valC = abs(y(i));
        valR = abs(y(i + 1));

        ## vrh je ako je tocka lijevo i desno manja
        if ((valL < valC) && (valR < valC))
            ## ukoliko do sada nismo imali vrh ili je trenutni veci od proslog zapisi ga
            if (indexOfLargestPeakSoFar == 0 || valC > valOfLargestPeakSoFar)
                valOfLargestPeakSoFar = valC;
                indexOfLargestPeakSoFar = i;
            endif
        endif
    endfor
```

```
## ukoliko razlika izmedju trenutnog vrha i zadnjeg zapisanog je manja od
## udaljenosti idi dalje, takvi vrhovi se ne gledaju
if (indexOfLargestPeakSoFar - indexOfLastPeak < ns_step_bin
    && indexOfLastPeak > 0)
    valOfLargestPeakSoFar = valC;
    indexOfLargestPeakSoFar = i;
endif

## prosla je velicina spremnika, zapisi vrh
if (i - indexOfLastPeak > ns_step_bin)
    x_peaks(length(x_peaks) + 1) = indexOfLargestPeakSoFar;
    y_peaks(length(y_peaks) + 1) = valOfLargestPeakSoFar;
    x_times(length(x_times) + 1) = indexOfLargestPeakSoFar * dt - dt;
    y_times(length(y_times) + 1) = y(indexOfLargestPeakSoFar);

    indexOfLastPeak = indexOfLargestPeakSoFar;
    valOfLastPeak = valOfLargestPeakSoFar;
    valOfLargestPeakSoFar = valC;
    indexOfLargestPeakSoFar = i;
endif

## ukoliko je sljedeci vrh veci od prethodnog, ali manji u tocki razlike
## zapisi ovaj vrh umjesto proslog
if (indexOfLargestPeakSoFar - indexOfLastPeak < ns_step_bin
    && valOfLargestPeakSoFar > valOfLastPeak
    && length(x_peaks) > 0)
    x_peaks(length(x_peaks)) = indexOfLargestPeakSoFar;
    y_peaks(length(y_peaks)) = valOfLargestPeakSoFar;
    x_times(length(x_times)) = indexOfLargestPeakSoFar * dt - dt;
    y_times(length(y_times)) = y(indexOfLargestPeakSoFar);

    indexOfLastPeak = indexOfLargestPeakSoFar;
    valOfLastPeak = valOfLargestPeakSoFar;
endif
```

```
endif
endfor

## sortiraj vrijednosti od najveće prema najmanjoj
[sorted_peaks, idx] = sort(y_peaks, 'descend');
## posljednji vrh koji je iznad tresholda
sorted_peaks
last_peak = 1;

## nadi zadnji vrh
for i = 1:(length(sorted_peaks) - 1)
## ako je razlika vrijednosti dva vrha veća od [dp] to je zadnji vrh!
    if (absdiff(sorted_peaks(i), sorted_peaks(i + 1)) > dp)
        last_peak = i
        break;
    endif
endfor

## pospremi vrhove
## ukoliko je zadnji vrh 1, ne postoje vrhovi
if (last_peak > 1)
    for i = 1:last_peak
        loct(i) = x_times(idx(i));
        # vremensku domenu pretvoriti u indexnu da nadjemo vrh (suprotno od line:68)
        peaks(i) = y_times(idx(i));
    endfor

## vremenska domena je poredana po najvisim vrhovima, poredaj pravilno
[sorted_times, idx] = sort(loct, 'ascend');
cloned_peaks = peaks(:).';

for i = 1:last_peak
    loct(i) = sorted_times(i);
    # vremensku domenu pretvoriti u indexnu da nadjemo vrh
```

```
    peaks(i) = cloned_peaks(idx(i));
    endfor
endif

    ## mora biti paran broj vrhova iznad tresholda
    ## ako je neparan broj vrhova iznad tresholda, taj treci je sum ili smetnja
    ## ako je peak neparan i veci od 1 umanji za jedan
    if (rem(last_peak, 2) != 0 && last_peak > 1)
        last_peak = last_peak - 1;
    endif

    ## vrijednost zadnjeg vrha iznad tresholda
    ##    last_peak = sorted_peaks(last_peak);
    if (last_peak == 1)
        treshold = sorted_peaks(last_peak) * (1 + dp / 100);
    else
        treshold = sorted_peaks(last_peak) * (1 - dp / 100);
    endif

endfunction
```

**Prilog C: Kôd algoritma za otkrivanje statičkog ekscentriciteta rotora**

```
clc;
clear all;
filename = 'Ulazni_pod_kvarovi.xlsx';
sheet = '35%EKSCMj';
frekvencija = 25;
period = 1/frekvencija;
period_ms = period*1000;
%time_sampling = 0.025;
time_sampling = 0.1;
br_tocaka = (period/time_sampling)*1000;
t = 0:time_sampling:period_ms;
Ms1Range = 'B3:B403';
Ms2Range = 'C3:C403';
Ms3Range = 'D3:D403';
Ms4Range = 'E3:E403';
Ms1 = xlsread(filename,sheet,Ms1Range);
Ms2 = xlsread(filename,sheet,Ms2Range);
Ms3 = xlsread(filename,sheet,Ms3Range);
Ms4 = xlsread(filename,sheet,Ms4Range);
Uef_Ms1 = rms_iznos(Ms1);
Uef_Ms2 = rms_iznos(Ms2);
Uef_Ms3 = rms_iznos(Ms3);
Uef_Ms4 = rms_iznos(Ms4);
Stat_Ekscentricitet = false;
eksc_Ms13 = 0;
eksc_Ms24 = 0;
diff_Ms13 = Uef_Ms1/Uef_Ms3
if (((diff_Ms13 > 1) && (diff_Ms13 < 1.083)) || ((diff_Ms13 > 0.917) && (diff_Ms13 < 1)))
    print = "NEMA STATICKOG EKSCENTRICITETA U SMJERU Ms1 i Ms3"
elseif (diff_Ms13 > 1.083)
    print = "STATICKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms1"
    eksc_Ms13 = 1
    posto_Ms13 = (diff_Ms13 - 1)*100
```

```

else
    print = "STATICKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms3"
    eksc_Ms13 = -1
    posto_Ms13 = (1/diff_Ms13 - 1)*100
endif
diff_Ms24 = Uef_Ms2/Uef_Ms4
if (((diff_Ms24 > 1) && (diff_Ms24 < 1.083)) || ((diff_Ms24 > 0.917) && (diff_Ms24 < 1)))
    print1 = "NEMA STATICKOG EKSCENTRICITETA U SMJERU Ms2 i Ms4"
elseif (diff_Ms24 > 1.083)
    print1 = "STATICKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms2"
    eksc_Ms24 = 1
    posto_Ms24 = (diff_Ms24 - 1)*100
else
    print1 = "STATICKI EKSCENTRICITET U SMJERU Ms4"
    eksc_Ms24 = -1
    posto_Ms24 = (1/diff_Ms24 - 1)*100
endif
if ((eksc_Ms13 != 0) || (eksc_Ms24 != 0))
    Stat_ekscentricitet = true
endif
## broj stapova
ns = 28;
## razlika vremena izmedju vrijednosti delta T
%dt = 0.025;
dt = 0.1;
## napravi x-os
x = 0:dt:40;
xlabel('Vrijeme [ms]');
ylabel('Napon [V]');
if (((diff_Ms13 > 1) && (diff_Ms13 < 1.083)) || ((diff_Ms13 > 0.917) && (diff_Ms13 < 1)))
    figure (1)
    plot(x,Ms1,"color", 'r','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    plot(x,Ms3,"color", 'b','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    legend("Ms1", "Ms3", "location", "northeast")

```

```

    title ({'Pozicija rotora:' print })
elseif (diff_Ms13 > 1.083)
    figure (1)
    plot(x,Ms1,"color", 'r','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    plot(x,Ms3,"color", 'b','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    legend("Ms1", "Ms3", "location", "northeast")
    title ({'Vrsta kvara:' print, '\Delta Ms13:' posto_Ms13 '%' })
else
    figure (1)
    plot(x,Ms1,"color", 'r','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    plot(x,Ms3,"color", 'b','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    legend("Ms1", "Ms3", "location", "northeast")
    title ({'Vrsta kvara:' print, '\Delta Ms13:' posto_Ms13 '%' })
endif
if (((diff_Ms24 > 1) && (diff_Ms24 < 1.083)) || ((diff_Ms24 > 0.917) && (diff_Ms24 < 1)))
    figure(2);
    plot(x,Ms2,"color", 'm','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    plot(x,Ms4,"color", 'g','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    legend("Ms2", "Ms4", "location", "northeast")
    title ({'Pozicija rotora:' print1 })
elseif (diff_Ms24 > 1.083)
    figure(2);
    plot(x,Ms2,"color", 'm','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    plot(x,Ms4,"color", 'g','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    legend("Ms2", "Ms4", "location", "northeast")
    title ({'Vrsta kvara:' print1, '\Delta Ms24:' posto_Ms24 '%' })
else
    figure (2);
    plot(x,Ms2,"color", 'm','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    plot(x,Ms4,"color", 'g','LineWidth',2); grid ON; hold ON;
    legend("Ms2", "Ms4", "location", "northeast")
    title ({'Vrsta kvara:' print1, '\Delta Ms24:' posto_Ms24 '%' })
endif
hold OFF;

```

## **Životopis**

**Stjepan Tvorić** rođen je u Zagrebu 1985. godine. Srednju školu je završio 2004. godine u Vrbovcu, a diplomirao je 2009. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, na temi "Modeliranje asinkronog vučnog motora metodom konačnih". Tijekom studija sudjelovao je na projektu o utjecaju elektromagnetskog zračenja trafostanica na ljudsko zdravlje, naručenog od strane HEP-a kod Zavoda za osnove elektrotehnike i električna mjerenja (FER ZOEEM). Od 2009. godine zaposlen je kao razvojni inženjer u KONČAR – Institutu za elektrotehniku, u Zavodu za rotacijske strojeve. Autor je i koautor nekoliko članaka objavljenih u časopisima, zbornicima, znanstvenim i stručnim konferencijama. Od 2014. godine drži vježbe i predavanja na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu iz predmeta Električni strojevi (I i II) i Tehnike održavanja i ispitivanja električne opreme. Član je domaće sekcije HRO CIGRE-a te individualni član međunarodne organizacije CIGRE-a.

## **Popis objavljenih radova**

### **Radovi u časopisima**

1. Elez, S. Car, S. Tvorić, B. Vaseghi: "Rotor Cage and Winding Fault Detection Based on Machine Differential Magnetic Field Measurement (DMFM)", IEEE transactions on industry applications, Vol. 53, No. 3, May – June 2017.
2. A. Elez, S. Car, S. Tvorić: "Air gap magnetic field – key parameter for synchronous and asynchronous machine fault detection", International Review of Electrical Engineering (IREE). 8, 3, 1-8, 2013.
3. A. Elez, S. Car, K. Meštrović, S. Tvorić: "Otkrivanje međuzavoynih kratkih spojeva namota rotacijskih strojeva analizom magnetskog polja u zračnom rasporu", Polytechnic&Design. Vol. I, No. 1, 2013.

### **Radovi na međunarodnim znanstvenim i stručnim konferencijama**

1. A. Elez, J. Študir, S. Tvorić: "Application of Differential Magnetic Field Measurement (DMFM method) in winding fault detection of AC rotating machines as part of expert monitoring systems", CIGRE Pariz 2018.
2. S. Tvorić, A. Kapović, A. Elez: "The Effective Monitoring of Key Rotor Parameters with Smart Energy Harvesting Device for AC Machines", WCCM 2017 – First World Congress on Condition Monitoring, London, UK, 2017, 13-16 June

3. S. Tvorić, A. Kapović, P. Koren, A. Elez: "Contactless transducer for simple and effective current measurement", HYDRO 2017: Shaping the Future of Hydropower, Seville, Spain, 2017, 9-11 October.
4. Elez, J. Študir, T. Pintarić, S. Tvorić: "Smart energy harvesting device for AC machines", HYDRO 2016: ACHIEVEMENTS, OPPORTUNITIES AND CHALLENGES : International Conference and Exhibition.
5. B. Tomičić, M. Petrinić, S. Tvorić: "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.
6. M. Petrinić, S. Tvorić, 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.
7. S. Tvorić, S. Car, B. Tomičić: "Dynamic characteristics analysis of the induction motor by analytical and FEM method", XXII Symposium Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits - EPNC 2012, June 26- June 29, 2012, Pula, Croatia
8. S. Tvorić, B. Tomičić, S. Car: "Calculation of Asynchronous Traction Motor Start-Up Characteristics by FEM Method", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2012)
9. S. Car, S. Tvorić, M. Rončević: "Mogući doprinosi primjene novih materijala i nanotehnologija daljnjem razvoju asinkronih strojeva", 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 5.–8.11.2017.
10. J. Sudarević, S. Vidić, N. Hasanspahić, S. Tvorić, A. Kazagić, A. Kapović, I. Bartulović, E. Letić, S. Mujić, S. Pezerović, M. Čukljek: "Sustavi uzbuda i monitoringa sinkronih generatora na hidroelektrani Vranduk", 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 5.–8.11.2017
11. S. Tvorić, A. Elez, J. Študir, T. Pintarić: "The measurement of rotor values by using an energy harvesting system", CIGRE - Study Committee A1 "Rotating Electrical Machines" - Colloquium "Rotating Electrical Machines for Power Generation", Vienna : CIGRE, 2017.
12. S. Tvorić, A. Elez, J. Študir, T. Pintarić: "Mjerenje i praćenje parametara rotora sinkronog generatora bežičnom mjernom opremom temeljenoj na harvesteru energije", 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 5.–8.11.2017.

13. S. Tvorić, A. Elez, J. Študir, T. Pintarić: "Mjerenje i praćenje parametara rotora sinkronog generatora bežičnom mjernom opremom temeljenoj na harvesteru energije", Zbornik odabranih radova 13. savjetovanja HRO CIGRE, Šibenik : HRO CIGRÉ, 2017. 6-17
14. S. Tvorić, A. Kapović, L. Sikimić, D. Milošević: "Monitoring visokonaponskih asinkronih motora EMCM sustavom u RiTE Gacko", 13. savjetovanje Bosanskohercegovačkog komiteta CIGRE, Neum, 17. – 21.09.2017.
15. S. Tvorić, J. Mišura, M. Pavičić, C. Klapčić: "Primjena ekspertnog monitoring sustava za asinkrone kavezne motore u elektroenergetskim objektima HEP-a", 11.savjetovanje HRO CIGRÉ 2013.

## **Biography**

**Stjepan Tvorčić** was born in Zagreb, Croatia, in 1985. He completed High School (gymnasium) in Vrbovec, Croatia, in 2004, and graduated at the Faculty of Electrical Engineering and Computing at the Department of High Voltage and Energy, University of Zagreb, Zagreb, in 2009. During the study, he participated in the project dealing with electromagnetic radiation of substation on human health, commissioned by the Croatian National Energy Company in the Department of Fundamental Electrical Engineering and Electrical Measurement (FER ZOEEM). After receiving his degree, he joined KONČAR – Electrical Engineering Institute, Inc., Zagreb, where he works as a Research and Development Engineer in the Rotating Machines Department. He is the author and co-author of several papers published on scientific conferences in the country and abroad. Since 2014 he holds lectures at the University of Applied Sciences in Zagreb, teaching the Electrical machines (I and II) and Maintenance and testing techniques of electrical equipment. He is an individual member of the international organization of CIGRE, and a member of HRO CIGRE, Croatian Section.