

*Bojan Jokanović – doktorska disertacija*

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Bojan M. Jokanović

**PROCENA PREOSTALOG ŽIVOTNOG  
VEKA IZOLACIONOG SISTEMA OBRTNE  
ELEKTRIČNE MAŠINE U USLOVIMA  
KOMBINOVANOG NAPREZANJA  
UTVRĐIVANJEM KARAKTERISTIKE VEKA  
TRAJANJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2023.

*Bojan Jokanović – doktorska disertacija*

UNIVERSITY OF BELGRADE

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Bojan M. Jokanović

**THE ASSESSMENT OF THE REMAINING  
LIFETIME OF THE INSULATION SYSTEM OF  
ROTATING ELECTRICAL MACHINES IN  
COMBINED STRAINS CONDITIONS BY THE  
LIFETIME DETERMINATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

## **PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE**

### **Mentor:**

dr Milan Bebić, vanredni profesor,  
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

### **ČLANOVI KOMISIJE:**

1. dr Zlatan Stojković, redovni profesor, Elektrotehnički fakultet u Beogradu
2. dr Zoran Lazarević, redovni profesor u penziji, Elektrotehnički fakultet u Beogradu
3. dr Nenad Kartalović, naučni saradnik, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd
4. dr Bogdan Brković, docent, Elektrotehnički fakultet u Beogradu
5. dr Koviljka Stanković, vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

DATUM USMENE ODBRANE:

## PROCENA PREOSTALOG ŽIVOTNOG VEKA IZOLACIONOG SISTEMA OBRTNE ELEKTRIČNE MAŠINE U USLOVIMA KOMBINOVANOG NAPREZANJA UTVRĐIVANJEM KARAKTERISTIKE VEKA TRAJANJA

### **Rezime**

Cilj ovog rada je razvoj pouzdanog, jednostavnog i vremensko-materijalo ekonomičnog algoritma za određivanje preostalog životnog veka obrtne električne mašine. Algoritam, koji je razvijen, se zasniva na univerzalnim konstruktivnim rešenjima obrtnih električnih mašina, na sofisticiranim metodama statističke matematike, iskustvu konstrukcionih biroa električnih obrtnih mašina, iskustvu radionica za remont električnih obrtnih mašina i poznavanja uticaja uslova eksploatacija električnih obrtnih mašina na karakteristike materijala tipičnih za njihovu izradu. Validacija razvijenog algoritma sprovedena je poređenjem njime dobijenih rezultata sa odgovarajućim rezultatima dobijenim u realnom vremenu, širokog dijapazona. Svi ekperimentalni postupci su vršeni visoko kvalitetnom profesionalnom opremom sa fabrički određenom mernom nesigurnošću tipa B. Merenja su vršena pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima i u skladu sa odgovarajućim standardima. Kombinovana merna nesigurnost svih primenjenih mernih postupaka je bila manja od 5 %.

Dostupni podaci iz literature kao i publikovana iskustva remontnih radionica ukazuju da preko 50% ukupnih kvarova na obrtnim električnim mašinama nastupa kao posledica gubljenja izolacionih svojstava izolacije statora. Kao osnovi uzrok slabljenja i gubljenja izolacionih svojstava statorske izolacije smatraju se pojedinačna naprezanja, kao i njihova sinergija, tokom eksploatacije električne obrtne mašine. Pritom se kao najvažniji tipovi naprezanja podrazumevaju: termičko, naponsko, mehaničko, ambijentalno i kombinovano. U praksi se javljaju, skoro, isključivo kombinovana naprezanja. To je u prethodno primenjivanim ispitivanjima ostatka životnog veka stvaralo problem da se izdvoji dominantni uticaj ili više dominantnih uticaja, pa se životni vek određivao na osnovu raspoloživih podataka koji uključuju sinergiju više dominantnih uticaja. Analizirajući takav postupak prezentiran u ranije objavljenim radovima ukazano je na njegove nedostatke, od kojih je najvažniji sama pretpostavka o aditivnoj sinergiji i iz čega je proistekla potreba za razvojem novog algoritma. Tako nastao novi algoritam za određivanje ostatka životnog veka, razvijen u ovom radu, ne polazi od različitih tipova naprezanja, već se ostatak životnog veka smatra posledicom jednog zbirnog, realnog naprezanja.

U osnovi izvedenog algoritma je aparat matematičke statistike koji je uslovljavao statističku koncepciju eksperimenta i izbor eksperimentalne opreme. Pritom se vodilo računa da statistički uzorci slučajnih veličina dobijenih eksperimentalno budu reprezentativni. Stohastičke veličine dobijene merenjem su pridruživane najopštijim raspodelama ekstremnih vrednosti čemu je dato fizičko tumačenje. Na taj način, prevođenje stohastičkih podataka u statističke i primenom Vilkinsonovog testa, testa korelacije, testa regresije izveden zakon porasta za teoretske statističke raspodele od interesa. Pri tome su izvršene određene dopune primenjenih algoritama statističke matematike da bi sam matematički postupak bio potpuno korektan i statistički strožiji (tu se prvenstveno misli na primenu Šoveneovog kriterijuma na slučajne uzorke kojima odgovaraju statističke raspodele čiji treći centralni momenat nije nula, kao i na korišćenje strožije statističke sigurnosti U testa).

Zakon porasta za teoretske statističke raspodele od interesa je dvostepenim postupkom korišćenjem krive životnog veka je omogućio da se izvrši predikcija ostatka životnog veka ispitivanjem uzorka uzetog iz karakteristične oblasti kanure. Takva koncepcija algoritma određivanja ostatka životnog veka je znatno pojednostavila merni postupak pošto je umesto ispitivanja 50 (ili više) statora električne obrtne mašine bilo dovoljno ispitati 50 uzoraka uzetih sa određenog broja kanura. Treba napomenuti da se u ovde uvedenom algoritmu vrši ispitivanje rastućim naponom, a ne konstantnim naponom. Ta zamena, konstantnog napona za rastući napon, znatno skraćuje vreme

potrebno za ispitivanje. Prilikom formiranja algoritma za određivanje preostalog životnog veka svaki međukorak je proveravan najstrožijim metrološkim metodama.

Kada je novi algoritam za određivanje preostalog životnog veka razvijen i validiran primenjen je u laboratorijskim, strogo kontrolisanim, uslovima na ispitivanje pojedinačnih i kombinovanih naprezanja na parametre izolacije statora električne mašine relevantne i uobičajene za određivanje ostatka životnog veka (tangens ugla gubitaka, otpornost jedan minut nakon stavljanja pod napon, indeks polarizacije, broj prenapona, napon praga pražnjenja, ac probojni napon, koeficijent proporcionalnosti i eksponent životnog veka). Ova ispitivanja podržana optičkom analizom omogućili su da se objasni najverovatniji sinergistički efekat uništenja statorske izolacije. Takvo tumačenje najverovatnijeg sinergističkog efekta degradacije je provereno u realnim uslovima i dalo je zadovoljavajuće rezultate.

U cilju demonstracije univerzalnosti razvijenog algoritma izvršena su merenja uticaja nestandardnog opterećenja, radioaktivnog zračenja, na ostatak životnog veka električne obrtne mašine. I ovo ispitivanje, veoma važno za pozdan rad nuklearnih energetskih postrojenja, dalo je zadovoljavajuće rezultate.

**Ključne reči:** obrtne mašine, izolacija statorskog namotaja, životni vek trajanja, ostatak životnog veka

**Naučna oblast:** Elektrotehnika

**Uža naučna oblast:** Energetika

**UDK broj:** 621.3

## THE ASSESSMENT OF THE REMAINING LIFETIME OF THE INSULATION SYSTEM OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES IN COMBINED STRAINS CONDITIONS USING THE LIFETIME CHARACTERISTICS

### **Abstract**

The goal of this paper is the development of a reliable, simple and time-material economical algorithm for determining the remaining lifetime of a rotating electric machine. The developed algorithm is based on universal constructive solutions of rotating electric machines, on sophisticated methods of statistical mathematics, the experience of design bureaus of electric rotating machines, the experience of workshops for the overhaul of electric rotating machines and knowledge of the influence of the conditions of exploitation of electric rotating machines on the characteristics of materials typical for their making. The validation of the developed algorithm was carried out by comparing the results obtained by it with the corresponding results obtained in real time, in a wide range. All experimental procedures were performed with high-quality professional equipment with a factory-determined measurement uncertainty of type B. Measurements were performed under well-controlled laboratory conditions and in accordance with appropriate standards. The combined measurement uncertainty of all applied measurement procedures was less than 5%.

Available data from the literature as well as published experiences of repair shops indicate that over 50% of total failures on rotating electrical machines occur as a result of the loss of the insulating properties of the stator insulation. Individual stresses, as well as their synergy, during the operation of the electric rotating machine are considered to be the main cause of the weakening and loss of the insulating properties of the stator insulation. The most important types of stress are: thermal, voltage, mechanical, ambient and combined. In practice, almost exclusively combined stresses occur. In previously applied tests of the remaining lifetime, this created a problem, the constant trend of extracting the dominant influence, or several dominant influences, so the lifetime was determined by it, that is, by the addition of several dominant influences. Analyzing such a procedure presented in previously published works, its shortcomings were pointed out, the most important of which is the very assumption of additive synergy, which led to the need for the development of a new algorithm. Thus, the new algorithm for determining the remaining lifetime, developed in this work, does not start from different types of stress, but the rest of the lifetime is considered the result of one collective, abstract stress.

The basis of the derived algorithm is the apparatus of mathematical statistics, which conditioned the statistical conception of the experiment and the choice of experimental equipment. In doing so, care was taken to ensure that statistical samples of random variables obtained experimentally were representative. Stochastic quantities obtained by measurement were associated with the most general distributions of extreme values, which were given a physical interpretation. In this way, the translation of stochastic data into statistical data and the application of the Wilkison test, the correlation test, the regression test derived the law of growth for theoretical statistical distributions of interest. At the same time, certain additions were made to the applied algorithms of statistical mathematics in order to make the mathematical procedure itself completely correct and statistically stricter (this primarily refers to the application of Chauvin's criterion to random samples corresponding to statistical distributions whose third central moment is not zero, as well as to the use of stricter statistical security U test).

The law of increasing probability for theoretical statistical distributions of interest is a two-step procedure using the lifetime curve made it possible to make a prediction of the remaining lifetime by examining a sample taken from a characteristic area of the kanura. Such a conception of the algorithm for determining the remaining lifetime greatly simplified the measurement procedure, since instead of testing 50 (or more) stators of an electric rotary machine, it was enough to test 50 samples taken from a certain number of cans. It should be noted that in the algorithm introduced here, the test is performed with increasing voltage, and not with constant voltage. This substitution of constant

voltage for increasing voltage significantly shortens the time required for testing. During the formation of the algorithm for determining the remaining lifetime, each intermediate step was checked using the strictest metrological methods.

When the new algorithm for determining the remaining lifetime was developed and validated, it was applied in laboratory, strictly controlled, conditions to test single and combined stresses on the insulation parameters of the electric machine stator relevant and common for determining the remaining lifetime (tangent of the loss angle, resistance one minute after voltage, polarization index, overvoltage number, discharge threshold voltage, ac breakdown voltage, proportionality coefficient and lifetime exponent). These tests supported by optical analysis made it possible to explain the most likely synergistic effect of stator insulation destruction. Such an interpretation of the most likely synergistic effect of degradation was verified in real conditions and gave satisfactory results.

In order to demonstrate the universality of the developed algorithm, measurements were made of the impact of non-standard load, radioactive radiation, on the remaining lifetime of the rotating electric machine. And this test, very important for the late operation of nuclear power plants, gave satisfactory results.

**Key words:** rotating electric machines, stator insulation, lifetime, remaining lifetime

**Scientific area:** Electrical Engineering

**Specific scientific area:** Power electronics

**UDC number:** 621.3

## **Zahvalnica**

*Veliki zahvalnost dugujem mentoru, dr Milanu Bebiću, vanrednom profesoru Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu na korisnim primedbama i savetima u pisanju disertacije.*

*Veliku podršku i razumevanje sam imao od kolega sa Elektrotehničkog instituta Nikola Tesla gde bih htio da izdvojim nesebično zalaganje dr Nenada Kartalovića.*

*Takođe, htio bih da zahvalim i dr Zoranu Lazareviću redovnom profesoru u penziji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, koji mi je pružio veliku profesionalnu pomoć i podršku u svim fazama izrade doktorske disertacije.*

*Zahvalnost i ljubav dugujem svojim roditeljma, Vesni i Miloradu, kao i bratu Aleksandru, koji su mi, u teškim vremenima iza nas, utabali put do mesta na kome se u ovom trenutku nalazim. Naravno, moja inspiracija i izvor snage je moja porodica, voljena supruga Maja, moja Maša i mali Matejko.*

*Doktorsku disertaciju posvećujem kćerci Maši i sinu Mateju.*



## SADRŽAJ

<b>1.</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1.	Obrtne električne mašine .....	1
1.2.	Konstrukcija obrtne električne mašine.....	2
1.3.	Kontinualni, prefabrikovani delovi namotaja obrtne mašine - kanure .....	4
1.4.	Cilj rada.....	9
<b>2.</b>	<b>STARENJE IZOLACIJE STATORA OBRJNIH ELEKTRIČNIH MAŠINA VELIKE SNAGE</b> .....	<b>11</b>
2.1.	Mehanizmi starenja izolacije .....	11
2.2.	Vrste naprežanja izolacionog sistema statora obrtnih električnih mašina .....	12
2.3.	Zapaženiji rezultati do sada objavljeni na temu procene ostatka veka trajanja izolacionog sistema obrtne električne mašine .....	15
<b>3.</b>	<b>PLANIRANJE I OBRADA REZULTATA EKSPERIMENTA</b> .....	<b>18</b>
3.1.	Statistička obrada eksperimentalnih rezultata.....	18
3.2.	Optimizacija koncepcije mernog postupka, veličina eksperimenta i korišćene opreme....	20
3.3.	Vejbulova statistička raspodela .....	21
3.4.	Mann–Whitney test, U-test (Wilcoxonov test sume rangova).....	24
3.4.1.	Procedura U-testa .....	24
3.5.	Korelacije i regresije .....	25
3.5.1.	Procena koeficijenta korelacije.....	28
3.5.2.	Procena regresionih pravih .....	29
3.6.	Zakon porasta verovatnoće električnog pražnjenja u izolacionoj strukturi .....	31
3.6.1.	Osnovi zakona porasta verovatnoće .....	32
3.6.2.	Zakon porasta verovatnoće za teorijske funkcije raspodele od interesa.....	33
3.7.	Određivanje krivih životnog veka izolacionog sistema .....	36
<b>4.</b>	<b>EKSPERIMENT I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA</b> .....	<b>41</b>
4.1.	Korišćena eksperimentalna oprema .....	42
4.1.1.	Postupak opterećenja (podešavanje parametara postupka opterećenja) .....	45
4.2.	Izbor nedestruktivne metode za određivanje karakteristika životnog veka obrtne mašine (prag parcijalnog pražnjenja ili tangens ugla gubitaka).....	45
4.3.	Ispitivani uzorci .....	46
4.3.1.	Ispitivanje na kanurama.....	46
4.3.2.	Ispitivanje na uzorcima uzetim sa kanure asinhronne obrtne električne mašine.....	47
4.4.	Određivanja životnog veka rastućim naponom .....	50
4.5.	Svođenje rezultata dobijenih metodom rastućeg napona na odgovarajuće rezultate koji bi bili dobijeni metodom konstantnog napona.....	52
4.6.	Postupak određivanja karakteristika životnog veka.....	55
4.7.	Ispitna oprema, postupak merenja i postupak obrade eksperimentalnih rezultata.....	55
<b>5.</b>	<b>REZULTATI DOBIJENI ISPITIVANJEM I DISKUSIJA</b> .....	<b>57</b>
5.1.	Izbor sklopa asinhronne obrtne električne mašine i fizičke pojave na mikroskopskom nivou relevantne za procenu životnog veka izolacije statora.....	57
5.1.1.	Rezultati i diskusije o primenjivosti ispitivanja slučajne promenljive prag parcijalnog pražnjenja na predikciju stanja izolacionog sistema statora .....	58

5.1.2.	Rezultati i diskusija o primenljivosti ispitivanja slučajne promenljive tangens ugla gubitaka na predikciju stanja izolacionog sistema statora.....	76
5.1.3.	Rezultati i diskusije o primenljivosti ispitivanja slučajne promenljive prag parcijalnog pražnjenja na uzorcima sa kanura na predikciju stanja izolacionog sistema statora ...	91
5.2.	Provera tačnosti metoda za određivanja eksponenta životnog veka izolacionog sistema asinhronne obrtne električne mašine.....	102
5.3.	Rezultati i diskusija uticaja kombinovanog naprezanja na preostali životni vek i druge karakteristike izolacionog sistema asinhronne obrtne električne mašine .....	104
5.4.	Efekat radioaktivnog zračenja na starenje izolacionog sistema.....	134
5.4.1.	Uticaj polja gama zračenja na stabilnost rada i dužinu životnog veka izolacionog sistema .....	135
5.4.2.	Rezultati i diskusija uticaja gama zračenja na preostali životni vek i druge karakteristike izolacionog sistema.....	135
5.4.3.	Uticaj neutronskega polja na starenje i stabilnost karakteristika izolacionog sistema	141
5.4.4.	Rezultati i diskusija uticaja neutronskega zračenja na preostali životni vek i druge karakteristike izolacionog sistema.....	142
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>144</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>146</b>
	<b>PRILOG.....</b>	<b>150</b>
	<b>BIOGRAFIJA .....</b>	<b>156</b>

**SPISAK SLIKA**

Slika 1.1 - Standardni oblik električne obrtne mašine [12] ..... 2

Slika 1.2 - Faze konstrukcije statora obrtne mašine: a) presek statorskog lima; b) slaganje statorskog paketa; c) paket statora pre ulaganja namotaja; d) paket statora sa ubačenim namotajima [11, 12]..... 3

Slika 1.3 - Faze konstrukcije rotora sa kliznim prstenovima i kaveznog rotora: a) presek rotorskog lima; b) paket rotorskih limova; c) rotor sa kliznim prstenovima i d) rotor kaveznog tipa [11, 12]..... 4

Slika 1.4 - Različite obrtne mašine po snazi, gabaritu i tipu namotaja: a) obrtna mašina male snage sa diskretnim namotajem statora; b) obrtna mašina srednje snage sa diskretnim namotajem statora; c) obrtna mašina srednje snage sa kontinualnim namotajem (kanura); d) mašine velike snage sa kontinualnim namotajima (kanura) [11, 12]..... 5

Slika 1.5 - Najčešće korišćeni oblici kanura (preuzeto iz [21, 22])..... 6

Slika 1.6 - Faze izrade kanure - namotaji pre savijanja: a) provodnik za namotavanje kalema sa lak-staklo-staklo-lak izolacionom trakom; b) kontura namotaja bez izolacije; c) kontura namotaja sa završnom (spoljašnjom) liskun-smola-poliester izolacijom [24]..... 7

Slika 1.7 - Oblik krajeva kanure prikazane na slici 1.5a (crtež i dve fotografije) [24]..... 7

Slika 1.8 - Gotova kanura sa naznačenim zonama koje su pretrpele različita naprezanja tokom tehnološkog postupka izrade [24] ..... 8

Slika 1.9 - Poprečni presek tela gotove kanure – naznačene dimenzije se odnose na tip kanure koja se ispituje u ovom radu: 1- lakirani provodnik; 2- lak-staklo-staklo-lak izolacija; 3- liskun-smola-poliester izolacija [23] ..... 8

Slika 2.1 - Dijagram zavisnosti električnog polja između dva pražnjenja od vremena curenja naelektrisanja.  $E_h(t)$  - (rezultujuće) polje na šupljini pri postojanju pražnjenja,  $E_o(t)$  - polje u dielektriku,  $E_s(t)$  - kompenzaciono polje zbog slobodnih naelektrisanja. a) slučaj normalne b) slučaj karbonizirane šupljine [43] ..... 12

Slika 2.2 - Merenje temperature namotaja jedne faze: a) kontakt za pristup ručnom merenju; b) senzor za kontinualno bezkontrolno merenje temperature [11, 12] ..... 13

Slika 2.3 - Pojava parcijalnog pražnjenja na kanuri obrtne električne mašine u pogonu ..... 14

Slika 2.4 - Oštećena kanura usled mehaničkih oscilacija ..... 14

Slika 2.5 - Raspodela električnog polja na poprečnom preseku gotove kanure dobijena metodom simulacije naelektrisanja uz izdvojen deo velikog povećanja polja usled ivičnog efekta [24]..... 17

Slika 3.1 - Mogući položaji veličina  $X$  i  $Y$ : a) veličine koje nisu korelisane; b) veličine koje su linearno nekorelisane; c) korelacija koja je pozitivna; d) korelacija koja je negativna; e) totalna korelacija [66]..... 26

Slika 3.2 - Ishod veličina  $X$  i  $Y$ , kao mere njihove zavisnosti: a) zavisnost je slaba; b) zavisnost je jaka.  $\beta$  je koeficijent pravca,  $s^2$  je varijansa. [66] ..... 26

Slika 3.3 - Perturbacija zavisnih i nezavisnih veličina u regresiji: a) regresija  $y$  od  $x$  ( $\sum(\Delta y_i)^2 = \min$ ); b) regresija  $x$  od  $y$  ( $\sum(\Delta x_i)^2 = \min$ ) [66]..... 27

Slika 3.4 - Uvezanost regresionih pravih linija  $x$  i  $y$  i odgovarajućih koeficijenata korelacije  $\rho$ : a)  $\rho = 0$ ; b)  $0 < \rho < 1$ ; c)  $\rho = 1$  [66] ..... 28

Slika 3.5 - Obostrani intervali pouzdanosti za koeficijent korelacije sa poverenja " $\epsilon=0,95$ " u funkciji dimenzije uzorka  $n$  [66]..... 29

Slika 3.6 - Grafički prikaz moguće regresione prave: - - - regresija  $y_i$  od  $x_d$ ; - - - - - regresija  $x_d$  od  $y_i$  [66] ..... 30

Slika 3.7 - Rezultati primene zakona uvećanja za razne raspodele: a) raspodele sa tačkastom vrednošću, b) raspodele sa donjom granicom, c) neograničene raspodele, neograničena sa bilo koje strane [66, 76]..... 34

Slika 3.8 - Postupak konstrukcije funkcija izvodnice probojnog vremena: a) karakteristike životnog veka; b) funkcije izvodnice probojnog napona; c) šematski prikaz [66].....	38
Slika 3.9 - Konstrukcija karakteristike životnog veka na osnovu rezultata eksperimenta konstantnim naponom: a) izvodnice probojnog vremena (Vejbulov papir); b) karakteristika životnog veka $u_d = k_d t_d^{-1/r}$ [66].....	39
Slika 4.1 - Instrument za merenje praga parcijalnog pražnjenja B2HV Diagnostics .....	43
Slika 4.2 - Merna kabina .....	44
Slika 4.3 - Instrument za merenje nejonizujućeg elektromagnetnog zračenja NARDA SRM 3006.....	44
Slika 4.4 - Stega sa kanurama koje su provele 5 godina u pogonu.....	46
Slika 4.5 – Termovizijska kamera HikVision.....	47
Slika 4.6 - Višeslojni i jednoslojni uzorci uzeti sa kanure koje su provele 5 godina u pogonu: a) višeslojni i jednoslojni uzorci uzeti iz zona I, II i III; b) višeslojni i jednoslojni uzorci raznih dimenzija uzeti iz zone III kanure .....	48
Slika 4.7 - Ispitni postupak konstantnim naponom [66].....	50
Slika 4.8 - Funkcije izvodnice prikazana na papiru verovatnoće prirodne raspodele [66].....	51
Slika 4.9 - Ispitni postupak rastućim naponom uz primenu određenog početnog napona ( $u_0$ ) [66]..	51
Slika 4.10 – Kumulativne funkcije raspodela i verovatnoće prirodne raspodele [66].....	52
Slika 4.11 - Određivanje karakteristika životnog veka postupkom rastućeg napona uz prikaz efekta temperature .....	53
Slika 4.12 - Karakteristika životnog veka dobijena rastućim naponom uz prikaz uticaja temperature [71].....	54
Slika 4.13 - Šema automatskog mernog i kontrolnog sistema u slučaju primene impulsnog napona .....	56
Slika 5.1 – Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja dobijene eksperimentalno na papiru troparametarske Vejbulove verovatnoće: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator. ....	59
Slika 5.2 - Rezultati U-testa primenjenog na hronološke poduzorke od 20 slučajnih promenljivih praga parcijalnih pražnjenja za sve statističke uzorke od po 100 vrednosti slučajnih promenljivih praga parcijalnih pražnjenja: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator. ....	62
Slika 5.3 - Histogrami slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja dobijene eksperimentalno za sve statističke uzorke na bazi statističkog uzorka od po 100 vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnih pražnjenja: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator. ....	65
Slika 5.4 - Rezultati U-testa na hronološki pročišćene poduzorke od 20 (ili manje) slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja za sve statističke uzorke od po 100 (ili manje) vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnih pražnjenja: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.....	69
Slika 5.5 - Rezultati U-testa na objedinjenim i prečišćenim hronološkim poduzorcima od oko 50 slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja za sve statističke uzorke od oko 100 vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja, dobijeni za ispitne setove kanura i ceo stator .....	70
Slika 5.6 - Zavisnost koeficijenta varijacije statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnih pražnjenja od faktora uvećanja n (broja kanura) zajedno sa odgovarajućim teorijskim zavisnostima za: 1) duplo-eksponencijalnu raspodelu; 2) Normalnu raspodelu; 3) dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu; 4) troparametarsku Vejbulovu raspodelu.....	71
Slika 5.7 - a) zavisnost standardnog odstupanja statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja od faktora porasta (dobijenog fitovanjem eksperimentalnih rezultata izrazom 3.41 po Vejbulovom eksponentu); b) zavisnost srednje vrednosti	

- statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja od faktora porasta (dobijenog zamenom određene vrednosti za najbolji fit,  $k = 0.111$ , u izrazu 3.40) ..... 72
- Slika 5.8 - Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja dobijenih za parove statističkih uzoraka: a) ceo stator – jedna kanura ( $1 - U_{NPPP} = 0.82 U_{NPPP1} + 0.03$ ;  $2 - U_{NPPP1} = 0.94 U_{NPPPS} + 0.63$ ); b) ceo stator – dve kanure ( $1 - U_{NPPPS} = 0.88 U_{NPPP2} + 0.12$ ;  $2 - U_{NPPP2} = 0.94 U_{NPPPS} + 0.56$ ); c) ceo stator – tri kanure ( $1 - U_{NPPPS} = 0.97 U_{NPPP3} + 0.27$ ;  $2 - U_{NPPP3} = 0.88 U_{NPPPS} + 0.60$ ); d) ceo stator – četiri kanure ( $1 - U_{NPPPS} = 1.06 U_{NPPP4} - 0.53$ ;  $2 - U_{NPPP4} = 0.66 U_{NPPPS} + 0.66$ ) i e) ceo stator – pet kanura ( $1 - U_{NPPPS} = 1.07 U_{NPPP5} - 0.19$ ;  $2 - U_{NPPP5} = 0.83 U_{NPPPS} + 0.40$ ) ..... 76
- Slika 5.9 – Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijene eksperimentalno na papiru troparametarske Vejbulove verovatnoće: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator..... 78
- Slika 5.10 - Rezultati U-testa (količnik statistike testa sa kritičnom vrednosti testa mere 0.05 za sve rangove testa), primenjenog na hronološke poduzorke od 20 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka za sve statističke uzorke od po 100 vrednosti slučajne promenljive tangens ugla gubitaka: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator. .... 81
- Slika 5.11 - Histogrami slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijene eksperimentalno za sve statističke uzorke na bazi statističkog uzorka od 100 slučajnih veličina: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator..... 84
- Slika 5.12 - Rezultati U-testa statističke nesigurnosti 5 % na hronološkim statističkim poduzorcima sa po 50 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka eksperimentalno dobijenih i svedenih na odgovarajuće slučajne promenljive statora u celini primenom zakona porasta verovatnoće..... 85
- Slika 5.13 - Zavisnost koeficijenta varijacije statističkih uzoraka slučajne promenljive tangens ugla gubitaka od faktora uvećanja  $n$  (broja kanura) zajedno sa odgovarajućim teorijskim zavisnostima za: 1) duplo-eksponencijalnu raspodelu; 2) normalnu raspodelu; 3) dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu; 4) troparametarsku Vejbulovu raspodelu..... 86
- Slika 5.14 - Zavisnost standardnog odstupanja i srednje vrednosti od faktora porasta: a) zavisnost standardnog odstupanja stohastičkih uzoraka slučajne promenljive tangens ugla gubitaka od faktora povećanja zajedno sa eksperimentalno dobijenim vrednostima; b) zavisnost srednje vrednosti statističkih uzoraka slučajne promenljive tangens ugla gubitaka zajedno sa tačkama..... 87
- Slika 5.15 - Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijenih za parove statističkih uzoraka: a) ceo stator – jedna kanura ( $1 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s = 1.06 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_1 - 74.06$ ;  $2 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_1 = 1.59 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s - 178.54$ ); b) ceo stator – dve kanure ( $1 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s = 1.05 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_2 - 36.73$ ;  $2 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_2 = 1.86 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s - 312.56$ ); c) ceo stator – tri kanure ( $1 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s = 1.04 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_3 - 5.22$ ;  $2 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_3 = 1.56 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s - 224.13$ ); d) ceo stator – četiri kanure ( $1 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s = 1.01 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_4 - 2.01$ ;  $2 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_4 = 1.35 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s - 135.34$ ) i e) ceo stator – pet kanura ( $1 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s = 1.01 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_5$ ;  $2 - 10^4 \cdot \text{tg} \delta_5 = 1.33 \cdot 10^4 \cdot \text{tg} \delta_s - 128.89$ ) ..... 90
- Slika 5.16 - Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka i prag parcijalnog pražnjenja za jednu kanuru koja je provela u pogonu 10 godina ( $1 - V_{ppp} = 0.0017 \cdot 10^4 \text{tg} \delta + 1.5$ ;  $2 - V_{ppp} = 0.0092 \cdot 10^4 \text{tg} \delta - 1.1$ ). ..... 91
- Slika 5.17 - Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja dobijene eksperimentalno za uzorke uzete sa pet godina korišćene kanure: a) višeslojni uzorak zona I; b) višeslojni uzorak zona II; c) višeslojni uzorak zona III; d) jednoslojni uzorak zona I; e) jednoslojni uzorak zona II; f) jednoslojni uzorak zona III ..... 95
- Slika 5.18 - Rezultati U-testa primenjenog na hronološke uzorke od 10 slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja za 50 eksperimentalno dobijenih slučajnih promenljivih prag

- parcijalnog pražnjenja za uzorke i za cele kanure za: a) višeslojni uzorak uzet iz zone I kanure; b) višeslojni uzorak uzet iz zone II kanure; c) višeslojni uzorak uzet iz zone III kanure; d) za jednoslojni uzorak uzet iz zone I kanure; e) za jednoslojni uzorak uzet iz zone II kanure; i f) za jednoslojni uzorak uzet iz zone III kanure. (\* - običan uzorak, • - složeni uzorak) ..... 98
- Slika 5.19 – Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih pobojnog napona: a) uzorak iz zone II jednoslojni; b) uzorak iz zone II višeslojni; c) uzorak iz zone I višeslojni. .... 99
- Slika 5.20 – Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja i pobojnog napona: a) kanura-višeslojni uzorak zone II ( $1 - U_{ppp} = 2.36U_{p_{v-II}} - 34.18$ ,  $2 - U_{p_{v-II}} = 1.09U_{ppp} + 12.79$ ); b) kanura-višeslojni uzorak zone I ( $1 - U_{ppp} = 2.83U_{p_{v-I}} - 41.70$ ,  $2 - U_{p_{v-I}} = 0.90U_{ppp} + 13.20$ ); c) kanura-jednoslojni uzorak zone II ( $1 - U_{ppp} = 1.39U_{p_{j-II}} - 19.08$ ,  $2 - U_{p_{j-II}} = 1.09U_{ppp} + 12.76$ ) i d) kanura-jednoslojni uzorak zone I ( $1 - U_{ppp} = 1.24U_{p_{j-I}} - 16.64$ ,  $2 - U_{p_{j-I}} = 0.90U_{ppp} + 13.20$ ). ..... 101
- Slika 5.21 - Krive veka starenja novih (oznaka 0) i onih koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina ..... 103
- Slika 5.22 - Zavisnost  $tg\delta$  od temperature uzorka: a) uzorak uzet sa zone I kanure; b) uzorak uzet sa zone II kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina. .... 105
- Slika 5.23 - Zavisnost  $tg\delta$  od vremena trajanja mehaničkog naprezanja merena na uzorcima uzetih sa zone I kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina. .... 106
- Slika 5.24 - Zavisnost  $tg\delta$  od broja naprezanja impulsnim naponom  $1.2/50 \mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog  $ac$  napona) merena na uzorcima uzetih sa zone I kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina. .... 106
- Slika 5.25 - Zavisnost otpora izolacije  $R_1$  od temperature merene na uzorcima uzetih sa zone I kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina. .... 107
- Slika 5.26 - Zavisnost napona praga parcijalnog pražnjenja od vremena uzoraka uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 15 godina, uzetih sa zona I (1), II (2) i III (3) kanure; — bez naprezanja, - - - jednosatno mehaničko naprezanje i •••• 1000 naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude uslovno nominalnog  $ac$  napona) ..... 112
- Slika 5.27 - Zavisnost probojnog napona od vremena uzorak uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 10 godina, sa zona I (1), II (2) i III (3) kanure; — bez naprezanja, - - - jednosatno mehaničko naprezanje i •••• 1000 naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog  $ac$  napona) ..... 112
- Slika 5.28 - Histogram (klase  $1+3.3\log n$ ;  $n$  – veličina statističkog uzorka) slučajne veličine  $ac$  probojnog napona, — nov uzorak, - - - uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina: a) zona III; b) zona I, tri sata mehaničkog naprezanja; c) zona III, 1000 naprezanja impulsnim naponom; d) zona III,  $90^\circ C$  temperatursko naprezanje; e) zona III, 90 % vlaga; f) zona I; g) zona I, tri sata mehaničkog naprezanja; h) zona I,  $90^\circ C$  temperatursko naprezanje; j) zona I, 90 % vlaga ..... 115

- Slika 5.29 - Karakteristike 63 % kvantila životnog veka određenih na osnovu merenja na uzorcima sa novih kanura — i uzoraka uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 5 godina - - - : a) uzorak uzet sa zone III; b) uzorak uzet sa zone II; c) uzorak uzet sa zone I. .... 121
- Slika 5.30 - Zavisnost  $tg\delta$  od temperature: 1 – novih kanura, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina. .... 125
- Slika 5.31 - Zavisnost  $tg\delta$  od vremena trajanja mehaničkog naprezanja: 1 – nove kanure, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina. .... 125
- Slika 5.32 - Zavisnost  $tg\delta$  od broja naprezanja impulsnim naponom 1.2/50  $\mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona): 1 – novih kanura, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina. .... 126
- Slika 5.33 - Zavisnost otpora izolacije  $R_1$  od temperature: 1 – novih kanura, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina. .... 126
- Slika 5.34 - Zavisnost napona praga parcijalnog pražnjenja od vremena, kanura koje su provele u pogonu 0, 5, 10, 15 i 20 godina: — bez naprezanja, - - - - jednosatno mehaničko naprezanje i •••• 1000 naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona). .... 126
- Slika 5.35 - Zavisnost probojnog napona od vremena, kanura koje su provele u pogonu 0, 5, 10, 15 i 20 godina: — bez naprezanja, - - - - jednosatno mehaničko naprezanje i •••• 1000 naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona). .... 127
- Slika 5.36 - Histogrami (klase 1+3.3logn; n – veličina statističkog uzorka) slučajne promenljive *ac* probojnog napona — uzoraka nove kanure i - - - - uzoraka uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 10 godina: a) zona II; b) zona II, 1000 naprezanja impulsnim naponom; c) zona II, 3 sata mehaničkog naprezanja i vlaga; d) zona II, 90°C temperaturno naprezanje i 1000 naprezanja impulsnim naponom; e) zona II, 90 % vlaga i 3 sata mehaničko naprezanje; f) zona II, 1000 naprezanja impulsnim naponom; g) zona II, 3 sata mehaničkog naprezanja, 1000 naprezanja impulsnim naponom i 90 % vlaga. .... 129
- Slika 5.37 - Karakteristike 63 % kvantila životnog veka novih kanura — i kanura koje su provele u pogonu 5 godina - - - - . .... 129
- Slika 5.38 - Fotografije oblasti kanura u kojima je došlo do oštećenja usled električnog proboja, zone I, zone II i prelaza između zone II i zone III kanura koje su u pogonu provele: a) 5 godina; b) 15 godina i c) 20 godina. .... 131
- Slika 5.39 - Zavisnost tangensa ugla gubitaka ( $tg\delta$ ) od primljene doze; 1- napon 1.2 kV, 2- napon 4.2kV, 3- napon 6kV: a) uzorak iz zone III navoja, b) uzorak iz zone II navoja i c) uzorak iz zone I navoja. [55] ..... 137
- Slika 5.40 - Zavisnost otpora  $R_1$  od primljene doze; 1-uzorak uzet iz zone I navoja; 2-uzorak uzet iz zone II navoja i 3-uzorak uzet iz zone III navoja. [55]..... 137
- Slika 5.41 - Indeks polarizacije u zavisnosti od primljene doze zračenja; 1-uzorak uzet iz zone I navoja, 2-uzorak uzet iz zone II navoja i 3-uzorak uzet iz zone III navoja. [55] ..... 138
- Slika 5.42 - Zavisnost *ac* napona praga parcijalnog pražnjenja od primljene doze  $\gamma$  zračenja: 1-zona I navoja, 2-zona II navoja i 3-zona III navoja. [55] ..... 138
- Slika 5.43 - Zavisnost *ac* probojnog napona od primljene doze  $\gamma$  zračenja: 1-zona I navoja, 2-zona II navoja i 3-zona III navoja. [55] ..... 139
- Slika 5.44 - Krive karakteristike životnog veka 63%-nog kvantila: a) neozračeni uzorci, b) ozračeni uzorci doza 50 Gy, c) ozračeni uzorci doza 100 Gy; 1-uzorci iz zone I navoja, 2-uzorci iz zone II navoja, 3- uzorci iz zone III navoja. [55] ..... 140

Slika 5.45 - Zavisnost eksponenta veka trajanja od primljene doze  $\gamma$  zračenja: 1-zona I navoja, 2-zona II navoja i 3-zona III navoja. [55] ..... 141



## SPISAK TABELA

Tabela 3.1: Tačkaste ocene parametara Weibulove raspodele [66].....	23
Tabela 3.2: Zavisnost koeficijenta varijacije od faktora porasta [66].....	36
Tabela 5.1: Rezultati dobijeni termovizijskim posmatranjem i istovremenim merenjem praga parcijalnog pražnjenja.....	66
Tabela 5.2: Koeficijent korelacije sa intervalom poverenja .....	73
Tabela 5.3: Koeficijent korelacije zajedno sa intervalima poverenja parova statističkih uzoraka od 100 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka .....	87
Tabela 5.4: Koeficijent korelacije sa intervalom poverenja za parove statističkih uzoraka slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja – probojni napon za višeslojne i jednoslojne uzorke uzetih iz zona I i II, i cele kanure.....	102
Tabela 5.5: Dobijeni ostatak veka trajanja izvedenim algoritmom za uzorke poznate vrednosti utrošenog veka trajanja i poznatog veka trajanja.....	103
Tabela 5.6: Zavisnost indeksa polarizacije od: a) temperature (za vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %) i d) vlažnosti (za temperaturu 20°C); merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno. ....	108
Tabela 5.7: Zavisnost indeksa polarizacije od sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom naprezanju, broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima; merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno. ....	111
Tabela 5.8: Zavisnost koeficijenta proporcionalnosti od: a) temperature (za vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %) i d) vlažnosti (za temperaturu 20°C); merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno. ...	117
Tabela 5.9: Zavisnost koeficijenta proporcionalnosti od: sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom naprezanju, broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno. ....	119
Tabela 5.10: Zavisnost eksponenta životnog veka od: a) temperature (za vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %) i d) vlažnosti (za temperaturu 20°C); merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno. ....	122
Tabela 5.11: Zavisnost eksponenta životnog veka od: sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom naprezanju, broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno. ....	124
Tabela 5.12: Zavisnost indeksa polarizacije, koeficijenta proporcionalnosti i eksponenta životnog veka novih kanura i kanura koje su provele u pogonu 5, 10, 15 i 20 godina respektivno, od: a) temperature (vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (temperatura 20°C, vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s (temperatura 20°C, vlažnost 20 %); d) vlažnosti (temperatura 20°C).....	132
Tabela 5.13: Zavisnost indeksa polarizacije, koeficijenta proporcionalnosti i eksponenta životnog veka novih kanura i kanura koje su provele u pogonu 5, 10, 15 i 20 godina respektivno, od sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom naprezanju,	

broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50 $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima .....	134
Tabela 5.14: Podaci o apsorbovanoj dozi neutronske i gama zračenja u zonama I, II i III kanure [63] .....	141
Tabela 5.15: Zavisnost tangensa ugla gubitaka ( $\text{tg}\delta$ ), indeksa polarizacije ( $s$ ), koeficijenta proporcionalnosti ( $k$ ), eksponenta veka trajanja ( $r$ ) u zavisnosti od primljene doze neutronske i gama zračenja [63].....	142

## 1. UVOD

Osnovno delo kontinualne fizike je, nesumnjivo, knjiga Isaka Njutna „Matematički principi filozofije prirode“. Na početku svoje rasprave Isak Njutn definiše fundamentalne pojmove, tj. materiju, prostor i vreme, pri čemu pravi distinkciju između njihove apsolutne i relativne suštine. Za rad za koji je ovo uvod, ali i za filozofiju fizike uopšte, vreme je najvažnija i najmisterioznija fundamentalna fizička veličina Njutnovog shvatanja univerzuma. Vreme Njutn definiše na sledeći način „pravo i matematički apsolutno vreme, koje nije ni u kakvoj vezi sa bilo čim spoljašnjim, ravnomerno protiče i zove se trajanje“. Uz nešto manje ograđivanje Njutn daje definiciju materije i prostora. Imajući takve definicije fundamentalnih pojmova Njutn formira metafizičko shvatanje prirode koje izražava trima jednačinama.

Njutnova filozofija prirode nikako ne odgovara subjektivnom osećanju misleće materije i to upravo zbog vremena. Naime, tok vremena u Njutnovom determinističkom modelu protiče iz neodređene, beskonačno udaljene, prošlosti, a završava u neizvesnoj, beskrajno udaljenoj, budućnosti. Da su u takvom svetu prošlost i budućnost sinonimi najlakše se vidi ako u Njutnovim jednačinama vreme  $t$  zamenimo negativnim vremenom ( $-t$ ). E, pa to tako ne može, pošto tada je sasvim svejedno šta je posledica a šta uzrok [1, 2]. To znači da je nejasno što je uzrok a šta posledica, a bez toga nije moguće inženjerski razmišljati.

Da bi se izbegla ova nelogičnost Njutnove definicije uvodi se strela vremena usmerena porastom entropije. Time trajanje dobija početak, starenje i kraj. Stari Kosmos i pretaće da postoji, stare zvezde i nestaće, planete takođe, nažalost i ljudi stare, a stare i obrtne električne mašine.

Neko bi mogao da se zapita zašto ovde, od svega što ima svoj vek trajanja, posebno su istaknute obrtne električne mašine. Odgovor je jednostavan, naime cilj ovoga je da se formira algoritam za procenu veka trajanja električne obrtne mašine i odredi uticaj različitih tipova naprezanja na vek trajanja.

### 1.1. Obrtne električne mašine

Obrtne električne mašine su pretvarači koji pretvaraju mehaničku energiju u električnu i obrnuto. Često su obrtne električne mašine reverzibilne, tj. mogu da vrše obe pomenute funkcije. Pritom, kod reverzibilnih obrtnih mašina nije potrebno vršiti promene u konstrukciji, strujnim putevima niti tip sprege u zavisnosti od funkcije koju vrše. Obrtne električne mašine se prema vrsti struje dele na obrtne električne mašine za jednosmernu struju i obrtne električne mašine za naizmeničnu struju. Obrtne električne mašine za naizmeničnu struju se dele na sinhronne i asinhronne. Grubo gledano svaka obrtna električna mašina sastoji se od rotora i statora (detaljnija struktura obrtnih električnih mašina biće razmatrana u narednom potpoglavlju) [3 - 6].

Pošto je predmet ispitivanja ovog rada vezan, uglavnom, za starenje obrtnih mašina njima će biti posvećeno najviše pažnje. Obrtna asinhrona mašina je vrsta električne mašine čija je osnovna karakteristika da brzina obrtanja rotora i brzina obrtnog magnetnog polja nisu jednake. Asinhrona mašina se retko koristi kao pretvarač mehaničkog rada u električnu energiju pošto ne proizvodi reaktivnu snagu (jedan od tih retkih izuzetaka su vetrogeneratori) [7, 8].

Kod asinhronih mašina, rotor ne može dostići brzinu obrtnog polja pošto u tom slučaju ne bi postojala relativna brzina između obrtnog polja i rotora pa magnetni fluks ne bi sekao provodnike rotora, indukovao elektromotornu silu u njima i čitav prethodno opisani proces bi bio nemoguć [9].

Namotaji su po svojoj prirodi omsko induktivni, a kako je za magnćenje magnetnog materijala i vazdušnog prostora između rotora i statora neophodna reaktivna energija ona se uzima iz mreže (pošto asinhrona mašina ne stvara reaktivnu energiju). Iz tog razloga je trofazna struja koju trofazni napon stvara u namotajima statora uvek induktivna. Zbog ekonomskog razloga asinhrona mašina se, kao što smo rekli, retko koristi kao pretvarač mehaničkog rada u električnu energiju. Iz istog razloga (ekonomskog), u energetskim sistemima koji funkcionišu sa velikim brojem asinhronih

mašina velikih snaga se postavljaju kondenzatorske baterije da bi se smanjilo angažovanje reaktivne snage iz mreže. Na slici 1.1 prikazan je standardni oblik obrtne električne mašine.

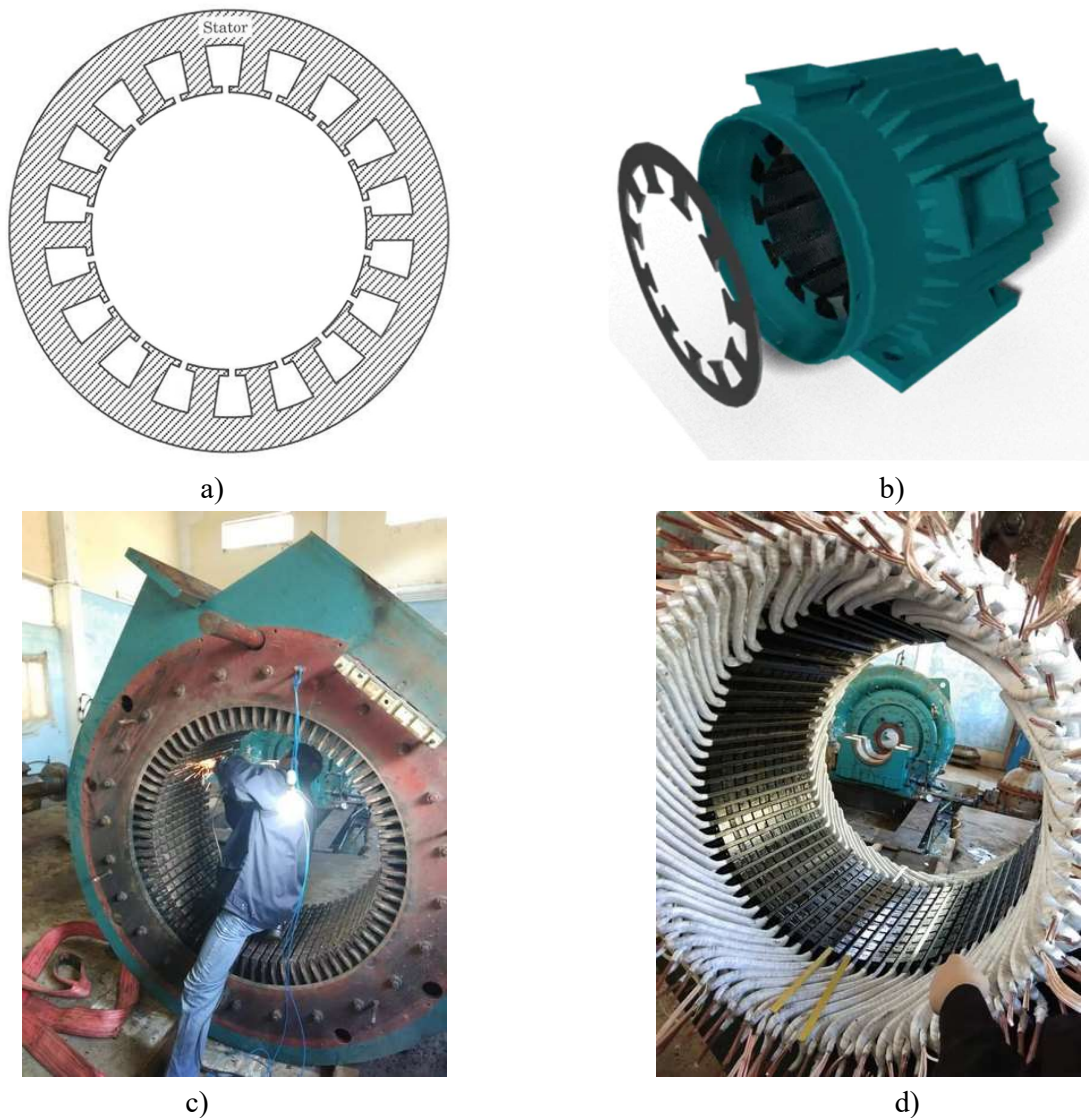


Slika 1.1 - Standardni oblik obrtne električne mašine [12]

## **1.2. Konstrukcija obrtne električne mašine**

Već je napomenuto da se obrtne električne mašine, grubo gledano, sastoje od statora i rotora. Stator obrtne električne mašine se konstruiše od limova materijala sa feromagnetnim karakteristikama između kojih se nalazi izolacija. Tendencija je da limovi od kojih se konstruiše stator budu što tanji da bi se minimizovali gubici dejstva histerezisa i vrtložnih struja. Za smanjenja gubitaka usled histerezisa i vrtložnih struja koriste se, obično, limovi legirani silicijumom (što smanjuje koercitivno polje, a povećava omsku otpornost), slika 1.2 [9, 10].

Sa unutrašnje strane statora se nalaze žlebovi za ubacivanje namotaja. Ovi žlebovi se dele na poluzatvorene i otvorene. Motori male snage imaju stator sa poluzatvorenim žlebovima. Otvoreni žlebovi su karakteristični za obrtne mašine velikih snaga. Treba napomenuti da se statori obrtnih mašina malih snaga ponekad, ali retko, izrađuju sa otvorenim žlebovima. Na slici 1.2 su prikazane faze konstrukcije statora obrtne mašine pri čemu su namotaji i njihovo umetanje u žlebove samo naglašeni na slici 1.2b. To nipošto nije zato što se konstrukcija namotaja smatra nebitnom, već naprotiv zato što su ove centralna tema sa aspekta ovog rada pa će im biti posvećena posebna pažnja [11, 12].



Slika 1.2 - Faze konstrukcije statora obrtne mašine: a) presek statorskog lima; b) slaganje statorskog paketa; c) paket statora pre ulaganja namotaja; d) paket statora sa ubačenim namotajima [11, 12]

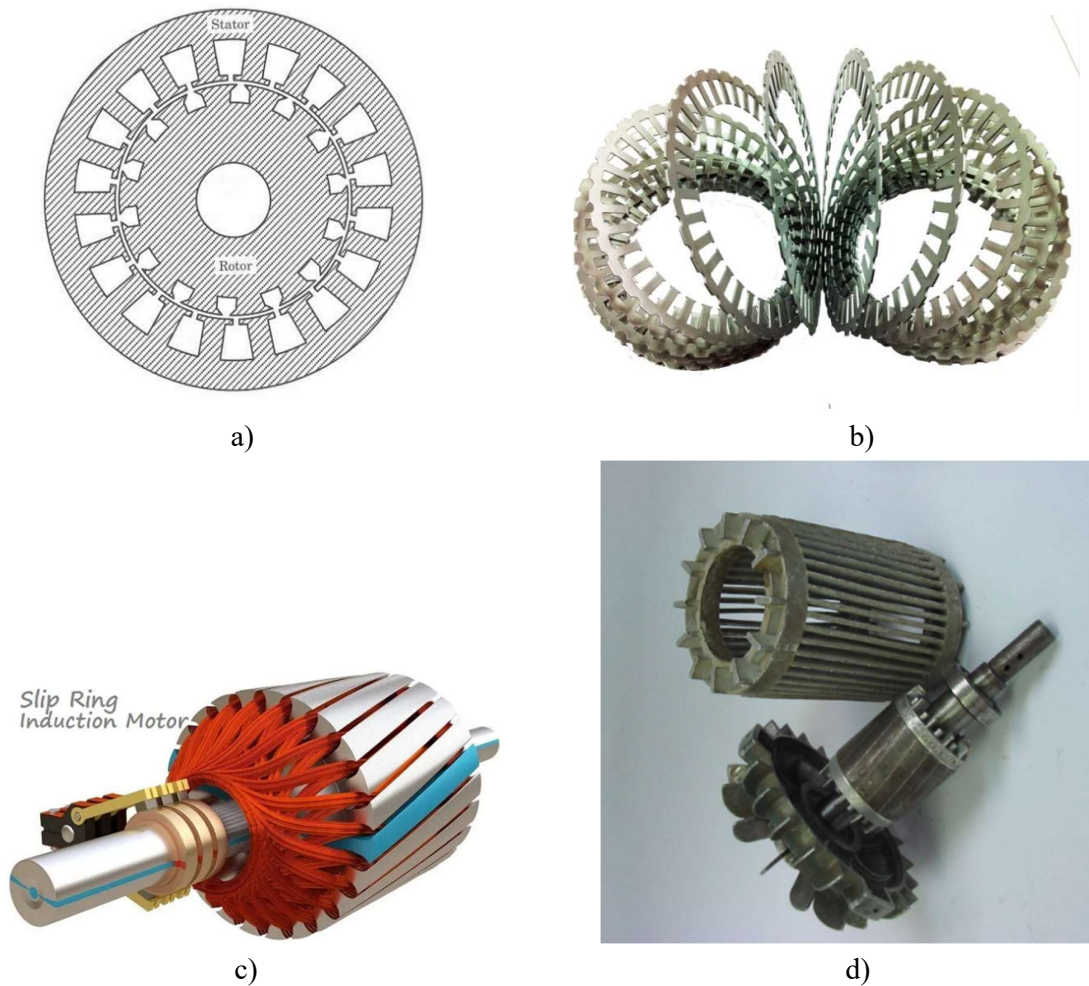
Rotor asinhronne mašine se isto tako konstruiše od materijala sa feromagnetnim karakteristikama. Namotaji se nanose na rotor na dva različita načina prema kojima se obrtne mašine dele na dve grupe. Te dve grupe obrtnih mašina su: mašine sa namotanim rotorom i mašine sa kaveznom rotorom.

Prema tipu rotora obrtne mašine se dele na: mašine sa kliznim prstenovima i mašine sa kratkospojenim rotorom [13, 14].

Mašine sa kliznim prstenovima karakteriše trofazni rotor čiji se počeci izvode na 3 klizna prstena, a krajevi se vezuju u zvezdu. Cilj ovakve konstrukcije je mogućnost spoljašnjeg pristupa namotaju rotoru [15].

Mašine kaveznih kratkospojnih rotora imaju rotor od masivnih provodnika koji su sa obe strane spojeni kratkospojnim prstenovima. Ovaj tip namotaja je potpuno kratkospojen što isključuje primenu četkica koje su često uzrok otkazivanja mašine [16].

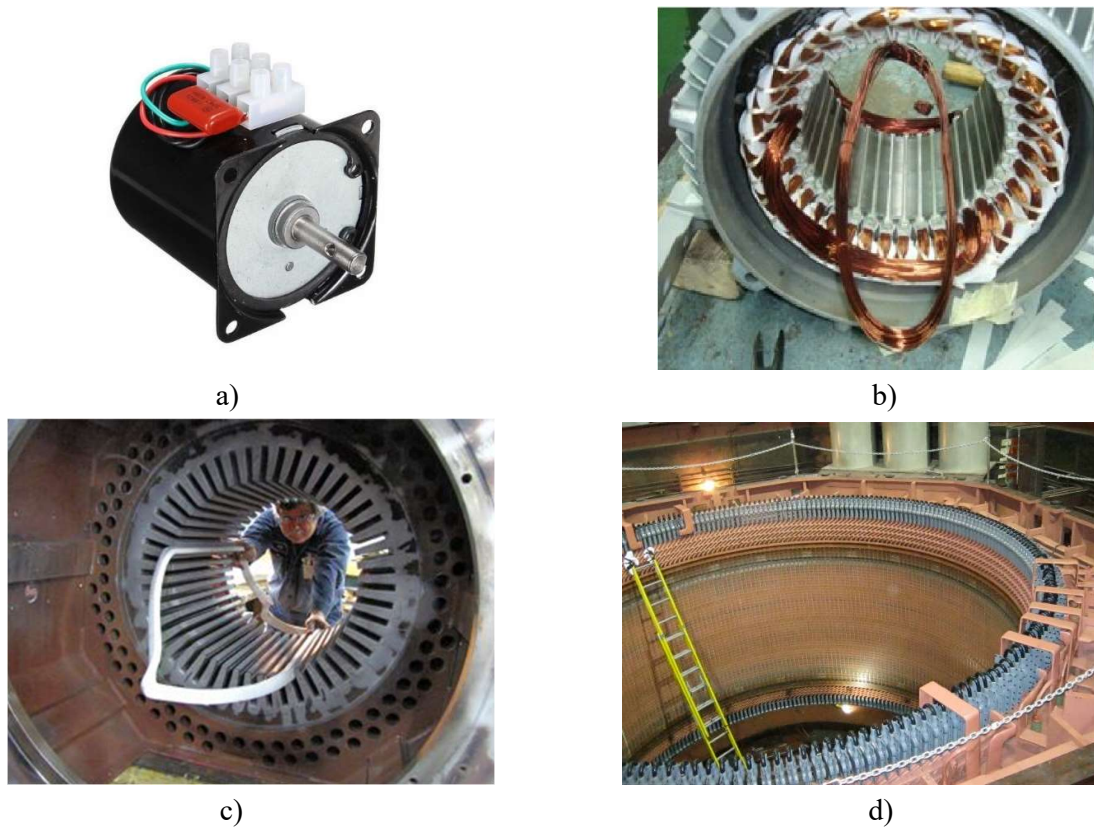
Na slici 1.3 su prikazane faze konstrukcije rotora sa kliznim prstenovima i kaveznog rotora.



Slika 1.3 - Faze konstrukcije rotora sa kliznim prstenovima i kaveznog rotora: a) presek rotorskog lima; b) paket rotorskih limova; c) rotor sa kliznim prstenovima i d) rotor kaveznog tipa [11, 12]

### 1.3. Kontinualni, prefabrikovani delovi namotaja obrtne mašine - kanure

Obrtne mašine mogu biti velike, srednje i male snage, a takođe mogu biti niskonaponske i visokonaponske. U skladu sa ovim prethodno navedenim podelama sa i gabariti obrtnih mašina što uslovljava i tipove namotaja koji se postavljaju u žljebove statorskog paketa, slika 1.4. Namotaji obrtnih mašina male snage, i ponekad srednje snage, su klasični diskretni žičani namotaji. Namotaji obrtnih mašina velike snage, i ponekad srednje snage, kao veoma važan deo sadrže prefabrikovane komponente, kanure (od sada će se, u daljem tekstu za ovu vrstu namotaja koristiti isključivo naziv kanura) [17, 18].



Slika 1.4 - Različite obrtne mašine po snazi, gabaritu i tipu namotaja: a) obrtna mašina male snage sa diskretnim namotajem statora; b) obrtna mašina srednje snage sa diskretnim namotajem statora; c) obrtna mašina srednje snage sa kontinualnim namotajem (kanura); d) mašine velike snage sa kontinualnim namotajima (kanura) [11, 12]

Pošto je predikcija ostatka životnog veka, što je tema ovog rada, iz razumljivih ekonomskih razloga od posebnog značaja za mašine velike snage i pošto dostupna literatura, podržana iskustvom remontnih radionica, tvrdi da više od 50 % kvarova na asinhronim mašinama nastaje usled oštećenja statorskog namotaja pa je potrebno posvetiti pažnju sastavnim delovima namotaja – kanurama [19, 20].

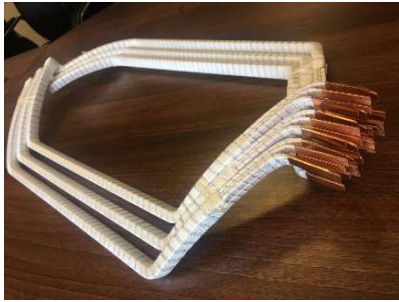
Kanure kao sastavni deo komponente statorskog namotaja mogu biti različitog oblika, pri čemu su im osnovne karakteristike i tehnološki postupak izrade veoma slični. Najčešće korišćeni oblici kanura prikazani su na slici 1.5, sa tim da im se geometrijske dimenzije prilagođavaju dimenzijama statorskog paketa. U eksperimentalnom delu ovog rada korišćiće se kanure oblika prikazanog na slici 1.5a (a i na slici 1.4c). Kako osobine kanura i njihove promene tokom eksploatacije obrtne mašine dominantno zavise od tehnološkog postupka njihove izrade i primenjenih materijala potrebno je, za razumevanje osnovnih aspekata njihovog starenja, ukratko posvetiti pažnju primenjenim materijalima i tehnološkom postupku proizvodnje [21, 22].



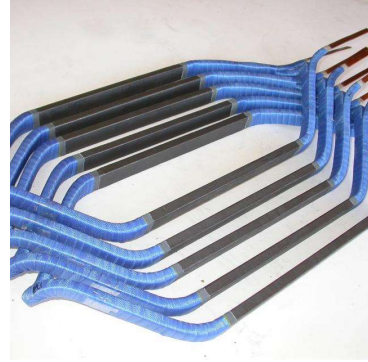
a)



b)



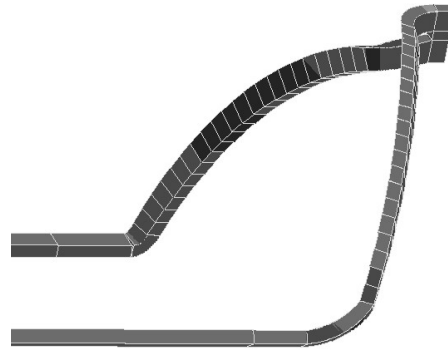
c)



d)



e)

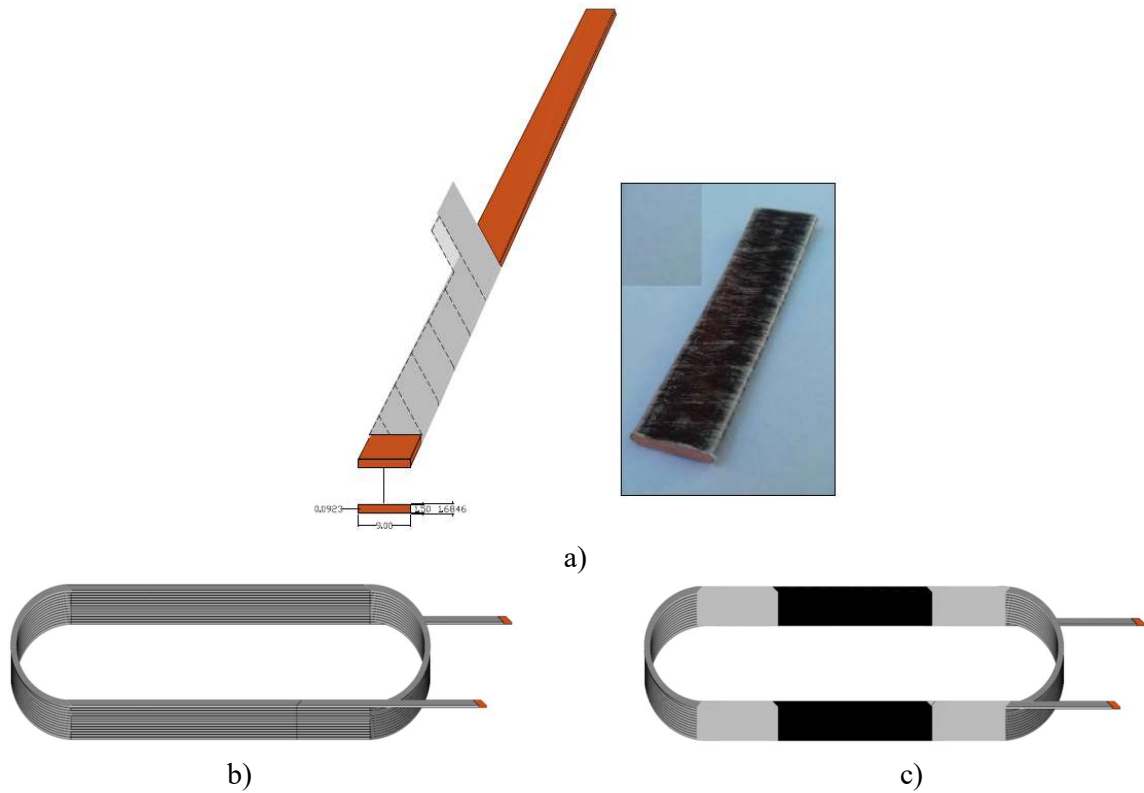


f)

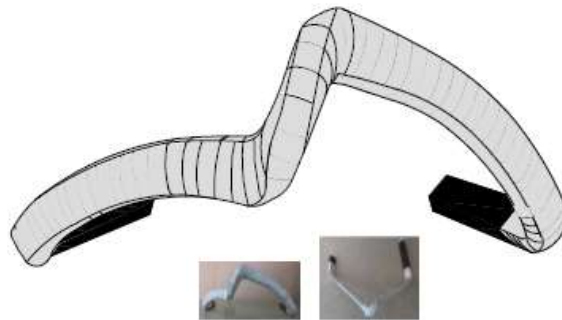
Slika 1.5 - Najčešće korišćeni oblici kanura (preuzeto iz [21, 22])

Na slici 1.6 su prikazane faze izrade kanure [23, 24]. Prvo se bakarni provodnik oblika tanke pravougaone trake dvostruko obmota izolacionom lak-staklo-staklo-lak trakom, slika 1.6a. Obmotavanje se vrši automatski pod uglom od  $45^\circ$ . Nakon izolovanja bakarnog provodnika od njega se formira elipsoidna sendvič struktura, slika 1.6b, koja se u celosti impregnira lakom, slika 1.6c. Posle nanošenja jedinstvene izolacije na elipsoidnu sendvič strukturu ona se presuje i uvrne tako da njeni krajevi dobiju oblik kao na slici 1.7.



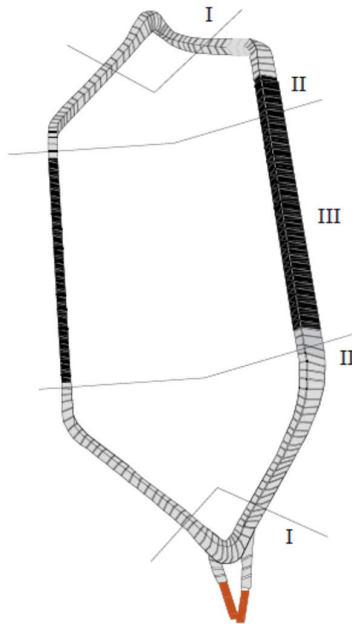


Slika 1.6 - Faze izrade kanure - namotaji pre savijanja: a) provodnik za namotavanje kalema sa lak-staklo-staklo-lak izolacionom trakom; b) kontura namotaja bez izolacije; c) kontura namotaja sa završnom (spoljašnjom) liskun-smola-poliester izolacijom [24]



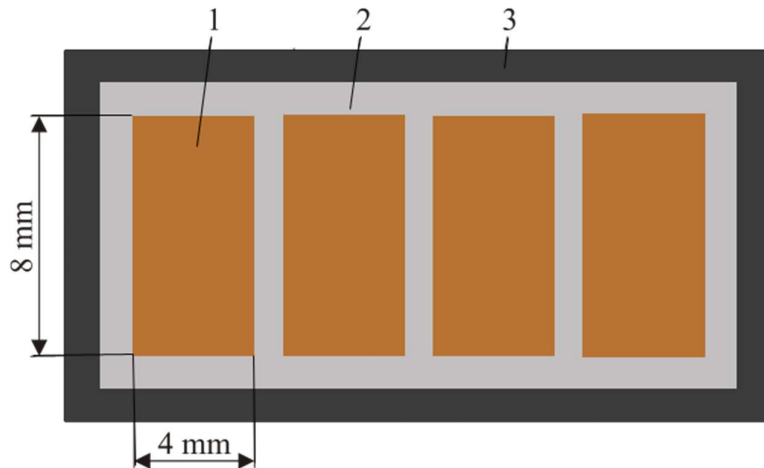
Slika 1.7 - Oblik krajeva kanure prikazane na slici 1.5a (crtež i dve fotografije) [24]

Nakon uvrtanja presovane elipsoidne sendvič strukture ona se još jednom izoluje liskun-smola-poliester izolacijom u celosti uz dodatnu izolaciju na krajevima čime je kanura gotova, slika 1.8 [24].



Slika 1.8 - Gotova kanura sa naznačenim zonama koje su pretrpele različita naprezanja tokom tehnološkog postupka izrade [24]

Poprečni presek tako dobijene kanure (bez dodatne izolacije na njenim krajevima) prikazan je na slici 1.9.



Slika 1.9 - Poprečni presek tela gotove kanure – naznačene dimenzije se odnose na tip kanure koja se ispituje u ovom radu: 1- lakirani provodnik; 2- lak-staklo-staklo-lak izolacija; 3- liskun-smola-poliester izolacija [23]

Gotova kanura prikazana na slici 1.8 podeljena je na oblasti označene sa zona I, zona II i zona III, tj. oblasti koje su prošle kroz različita mehanička naprezanja tokom tehnološkog postupka izrade kanure i koje trpe različita naprezanja tokom rada obrtne mašine. Oblast kanure označena kao zona I je oblast u kojoj je presovana i izolovana elipsoidna sendvič struktura pretrpela dvostruko naprezanje na uvrtanje prilikom formiranja konačnog oblika kanure. Oblast kanure označena kao zona II je oblast u kojoj je presovana i izolovana elipsoidna sendvič struktura pretrpela jednostruko naprezanje na uvrtanje prilikom formiranja konačnog oblika kanure. Oblast kanure označene kao zona I i zona II se nalaze izvan žljeba statorskog paketa prilikom kompletiranja statora. Oblast kanure

označena kao zona III je oblast u kojoj presovana i izolovana elipsoidna sendvič struktura nije pretrpela nikakva mehanička naprezanja prilikom formiranja konačnog oblika kanure i koja se nalazi u žljebu statorskog paketa prilikom kompletiranja statora [25].

U prethodnom primeru dat je prikaz kanure i postupka njene tehnološke izrade uz navođenje izolacionih materijala koji se tom prilikom koriste. Svi dati podaci se odnose na kanure koje se koriste za izradu obrtnih mašina u fabrici „Sever“ Subotica. Sve kanure proizvedene u ovoj fabrici bile su predmetne opsežnih istraživanja u okviru projekta „Istraživanja automatizovanih elektromotornih pogona“ kojim je rukovodio profesor Predrag Duduković [26 - 28]). Treba naglasiti da razni proizvođači obrtnih mašina velike snage, pripremaju i razvijaju sopstveni sistem izolacije, prema iskustvu i tehnološkim mogućnostima.

Uprkos specifičnostima, može se reći da se za izolaciju skoro svih kanura koriste folije ili trake, na bazi staklenih niti. Staklene trake, odnosno folije, preuzimaju mehanička naprezanja i u toku izrade i u pogonu. Staklene niti moraju biti bez alkalaja.

Pored staklenih traka, koriste se i poliesterske niti, kao noseći deo izolacionog materijala. Zbog visoke cene staklene tkanine, ima pokušaja da se celulozna vlakna primene u iste svrhe. Međutim, celulozna vlakna nisu ravna staklenim vlaknima, ni u pogledu toplotne otpornosti niti kao dielektrik, ali impregnirana odgovarajućim sredstvima mogu da zadovolje zahteve za izolaciju u uslovima eksploatacije [19].

Liskun je osnova svih izolacija za kanure visokonaponskih obrtnih mašina [19]. Primenjuje se u obliku listova i kao liskunski papir. Da se proizvede složena izolacija sa liskunom u listovima, mora se koristiti kvalitetan liskun, ali je tehnologija izrade relativno jednostavna. Za proizvod sa liskunskim papirom koristi se otpadni liskun, a tehnologija izrade je složenija što poskupljuje proizvod. Tako da nema znatne razlike u ceni. Po osobinama obe vrste liskunskih proizvoda imaju prednosti i mane, te su približno jednako rasprostranjene u primeni.

U toku razvoja izolacionih materijala za obrtne mašine velike snage, staklo kao nosilac i liskun kao osnova se nisu menjali. Znatne su, i može se reći, stalne promene u vezivu koje predstavlja važan deo ove složene izolacije pošto vezivna izolacija služi za zalivanje kanure kada se postavljaju žlebove statorskog paketa. Vezivo se prilagođava tehnologiji i istovremeno diktira njen razvoj. Prvo su se koristile prirodne smole, kao šelak i razne kombinacije bitumenskih smola.

Kako razvoj obrtnih mašina ide u pravcu povećanja specifičnog iskorišćenja po gabaritu, tj. opterećenje treba da raste što znači da se javlja potreba za stalnim usavršavanjem izolacije. To usavršavanje je u primeni dielektrika koji podnose veća mehanička opterećenja, a odgovor je nađen u primeni sintetskih smola i njihovih modifikacija. Za rešenje ključnog pitanja, veziva, rešenje je urađeno u primeni polieternih epoksilnih smola koje se umrežavaju očvršćivačem.

Dalji razvoj izolacije obrtnih mašina ide u smeru takozvane kompleksne izvedbe statorskog namotaja u cilju povećanja otpornosti na dinamička opterećenja. To se postiže kompletnom impregnacijom statora sistemom vakuum-pritisk (u cilju izbegavanja vazdušnih mehurova). Ovaj postupak je ekonomski opravdan samo za vrlo visoka specifična električna naprezanja, pa se paralelno razvijaju i drugi izolaciono-tehnološki postupci.

U nizu problema razvoja izolacionih sistema statora i tehnologije izrade kanura obrtnih mašina velike snage vrednovanje izolacionog sistema u pogledu ponašanja tokom eksploatacije i stabilnost karakteristika izolacionog sistema u pogledu termičkih, mehaničkih i ambijentalnih naprezanja je od presudnog značaja.

#### 1.4. Cilj rada

Cilj ovog rada je da se formira ekonomičan, jednostavan, brz i pouzdan eksperimentalno-statistički postupak kojim se može izvršiti predikcija ostatka veka trajanja izolacije statora obrtne mašine velike snage uz pridruživanje odgovarajuće statističke pouzdanosti dobijenom rezultatu. Dobijeni rezultat, svi međukoraci i korišćene hipoteze za razvoj teorijsko-statističkog modela su

verifikovani realnim ili numeričkim eksperimentom pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. U svim slučajevima vršenja eksperimenta su primenjeni profesionalni merni instrumenti male merne nesigurnosti, što će, uz detaljan budžet merne nesigurnosti, obezbediti da se rezultati dobijaju uz veoma prihvatljivu kombinovanu mernu nesigurnost (koja će za sva merenja biti izražena). Budžet merne nesigurnosti predstavlja sve elemente koji se uzimaju u obzir pri proračunu merne nesigurnosti tip B [prilog]. Tako dobijeni algoritam za predikciju ostatka veka trajanja primeniće se na izolaciju statora pod uslovima različitih naprezanja kojima su obrtne (sinhrone i asinhronne) mašine izložene tokom eksploatacije i zaključiće se kako najčešći tipovi naprezanja (samostalno ili sinergistički) utiču na brzinu starenja izolacije obrtnih mašina velike snage.

## 2. STARENJE IZOLACIJE STATORA OBRTHNIH ELEKTRIČNIH MAŠINA VELIKE SNAGE

Proizvodnja i potrošnja električne energije se, u velikoj meri, ostvaruje obrtnim električnim mašinama. Električne mašine su ovakvu rasprostranjenost stekle relativno zahvaljujući jednostavnoj konstrukciji, izradi, održavanju, kao i velikom stepenu pouzdanosti u pogonu. Dosadašnji napori u razvoju i proizvodnji obrtnih mašina odražavaju se, uglavnom, u uspešnom povećanju električne snage dobijene po jedinici gabarita materijala.

Efekat povećanja električne snage po jedinici gabarita materijala se postiže tehnološkim napretkom u konstrukciji obrtnih mašina velike snage i novim materijalima [29]. Ipak i pored toga, kod obrtnih mašina velike snage može da dođe do neočekivanog ispada iz pogona. Ako se to dogodi posledice mogu biti veoma teške kako sa materijalne tako i sa ekonomske tačke gledišta [30 - 33].

### 2.1. Mehanizmi starenja izolacije

Do starenja izolacije namotaja dolazi usled različitih naprežanja. Tipovi naprežanja se mogu klasifikovati prema promenama koja izazivaju u materijalu na: hemijske, fizičko-hemijske, termičke, električne i strukturalne. Ove promene se mogu javljati u izolacionom sistemu pri normalnom pogonu ili tokom čuvanja komponenata u magacinu. Usled ovih promena prvobitne osobine izolacionog sistema mogu se promeniti u toj meri da njegovi delovi postanu neprimenjivi za predviđenu namenu.

Naravno, za različite izolatore proces starenja ima različit intenzitet povezan sa vrstom naprežanja. Ako se izolacioni materijali podele prema agregatnom stanju pokazuje se da vakuum i gasovi ne trpe značajne promene (tako reći nikakve ako je dihtovanje dobro) za razliku od tečnih i čvrstih izolatora kojima je proces starenja jedna od najznačajnijih karakteristika. Iz tog razloga se u praksi uvodi pojam vek trajanja izolacionog sistema koji se za potrebe predikcije pouzdanosti deli na komplementarne pojmove: utrošen vek trajanja i ostatak veka trajanja. Ove veličine, naravno, nemaju determinističku prirodu [34 - 40].

Pošto je izolacioni sistem obrtne mašine u najvećoj meri od čvrste materije (mada smola tu ne odgovara definiciji čvrstog agregatnog stanja kao ni neki materijali u amorfnom stanju), ovde će se posebna pažnja posvetiti starenju izolacionih materijala u čvrstom stanju.

Starenje izolacionih materijala u čvrstom agregatnom stanju nije dovoljno istraženo, ali nije netačna tvrdnja da na starenje čvrstih izolacionih materijala presudno utiču temperatura i električno polje. Međutim i druga pomenuta naprežanja imaju znatan uticaj pogotovo što zbog kompleksnosti uzajamnog delovanja (sinergije) nije moguće izdvojiti doprinos samo jednog tipa, naročito ne za obrtne mašine u pogonu [38, 39].

Prema udžbeničkoj literaturi [39, 40] vek trajanja izolacije od intenziteta električnog polja  $E$  dato je empirijskim obrascem:

$$\tau_s = A \cdot E^{-m} \quad (2.1)$$

gde su  $A$  i  $m$  konstante.

Na isti način je nastao izraz koji pokazuje vek trajanja u zavisnosti od temperature ( $T$ ):

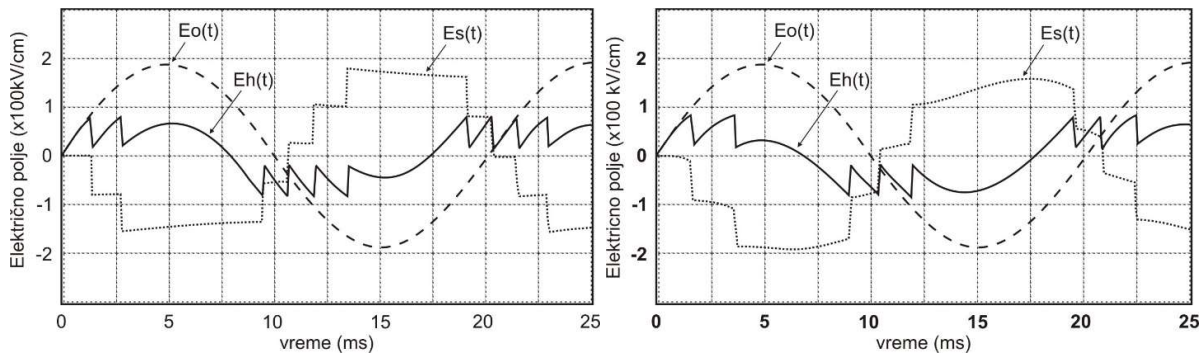
$$\tau_s = \tau_{0S} \cdot e^{C/kT} \quad (2.2)$$

gde je  $\tau_{0S}$  vek trajanja izolatora pri normalnoj radnoj temperaturi,  $k$  je Bolcmanova konstanta i  $C$  je konstanta za dati sistem.

Treba napomenuti razliku koja postoji u mehanizmu starenja između kristala i polikristala, odnosno polimera. Za kristale je karakteristično da starenje izaziva električno polje i temperatura.

Kristali stare pretežno usled porasta elektronske provodljivosti. Za polimere je karakteristično da do starenja dolazi pri naizmeničnom električnom polju pri čemu je njihov vek trajanja proporcionalan recipročnoj vrednosti učestalosti. Kod polimera značajan uticaj na vek trajanja ima i parcijalno pražnjenje.

Parcijalno pražnjenje makroskopski se manifestuje nestabilnim strujnim udarima čija je amplituda promenljiva i koji penetriraju u zapreminu izolatora. Po pravilu oni nastaju na mestima najmanje dielektrične čvrstoće ili u vazдушnim balonima nastalim kao greška tehnološkog postupka izrade. Na slici 2.1 je prikazana zavisnost električnog polja između dva pražnjenja od vremena curenja naelektrisanja, za male promene slobodnog naelektrisanja (slika 2.1a) i u uslovima povećane provodnosti materijala izolacije, povećane karbonizacije zidova šupljine i povećanih struja puzanja (slika 2.1b) [43].



Slika 2.1 - Dijagram zavisnosti električnog polja između dva pražnjenja od vremena curenja naelektrisanja.  $E_h(t)$  - (rezultujuće) polje na šupljini pri postojanju pražnjenja,  $E_o(t)$  - polje u dielektriku,  $E_s(t)$  - kompenzaciono polje zbog slobodnih naelektrisanja. a) slučaj normalne b) slučaj karbonizirane šupljine [43]

Uz ovako skromne podatke o mikroskopskim mehanizmima starenja izolacije u čvrstom agregatnom stanju veoma je teško, tačnije nemoguće, doći do nekog teorijski zasnovanog obrasca za proračun ostatka veka trajanja obrtne mašine koja funkcioniše u pogonu pod sinergijom svih mogućih napreznja. Međutim, zbog važnosti procene ostatka veka trajanja obrtnih mašina i njene korelacije sa stanjem sistema statorske izolacije vrše se istraživanja koja omogućavaju neke približne procene [44].

## 2.2. Vrste napreznja izolacionog sistema statora obrtnih električnih mašina

Kao što je rečeno do degradacije sistema izolacije statora obrtne mašine dolazi procesom starenja. Pritom, više faktora (vrsta napreznja) svako na svoj način dovode do starenje različitih delova izolacionog sistema. Međutim, starenje izolacionog sistema nije homogeno već različita napreznja različito utiču na njegove konstruktivne komponente.

Vrste napreznja koji utiču na starenje izolacionog sistema statora su: termička, naponska, mehanička i ambijentalna. U praksi se ova napreznja ne javljaju izdvojeno i izolovano već se javljaju zajedno proizvodeći sinergističke efekte i poznata su kao kombinovana napreznja. Zbog kompleksnosti sinergističkog delovanja raznih napreznja unutar kombinovanog napreznja ne postoji opšta metoda za dijagnostiku izolacionog sistema statora obrtne električne mašine kao ni za pouzdano određivanje vremena bezbedne eksploatacije električne mašine. Situacije sa uticajem pojedinih tipova napreznja na stanje izolacije statora su uspešno verifikovane, ali je ujedno i dokazano da ti efekti nisu aditivni u slučaju kombinovanog napreznja [45].

Od tipova napreznja koja utiču na stanje izolacije statora obrtne električne mašine najviše je ispitano termičko. U ranim radovima iz ove oblasti se dovode u vezu starenje usled termičkog napreznja sa mehaničkim promenama koje ono izaziva [46]. Termičko napreznje povezuje sa brzinom hemijskog starenja [47] na osnovu čega je izveden izraz koji je već dat (2.2) (veoma osetljiv na promenu temperature). Relacija (2.2) je prihvaćena i verifikovana za sve situacije kod kojih ne dolazi do sekundarnih hemijskih reakcija višeg reda.

Obzirom na značajnu ulogu termičkog napreznja statorske izolacije vrše se stalna (*online*) merenja temperature namotaja pojedine faze. To se radi tako što se uz namotaje ubacuju temperaturski senzori koji omogućavaju pristup merenju temperature ili koji stalno mere i bežično šalju podatke u sistem za upravljanje, slika 2.2.

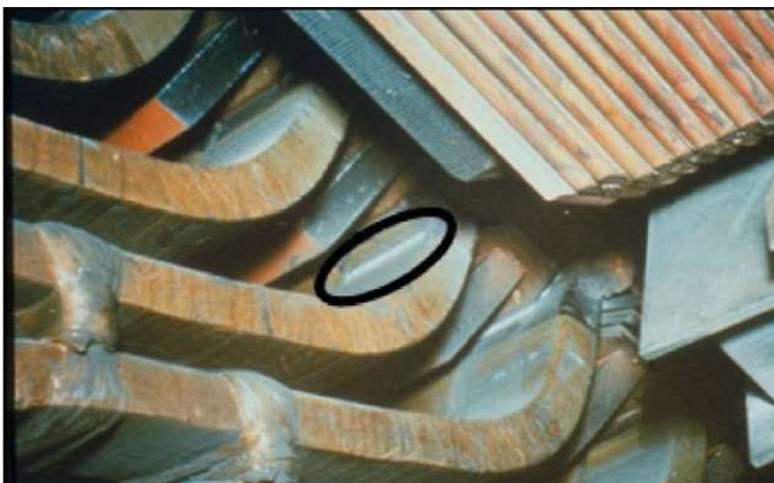


Slika 2.2 - Merenje temperature namotaja jedne faze: a) kontakt za pristup ručnom merenju; b) senzor za kontinualno bezkontrolno merenje temperature [11, 12]

Naponska izdržljivost je jedna od najbitnijih karakteristika izolacionih materijala ili sistema. Naponska napreznja se dele na jednosmerna, naizmenična i impulsna. Napreznje jednosmernim i naizmeničnim naporom većim od nominalnog se retko javlja. Ispitivanje starenja izolacije statora obrtne električne mašine usled porasta vrednosti (amplitude) jednosmernog i naizmeničnog napona se retko vrši, pošto se relativno brzo okončava probom. Sa aspekta naponskog napreznja izolacije statora obrtne mašine najinteresantnije je napreznje impulsnim naponom (atmosferskog ili komutacionog oblika) zbog pojave granjanja (*treeing*) koje ubrzava proces starenja, a može da dovede i do pojave proba [48 - 50]. Prenaponi nastaju u mreži. Poreklo im je komutaciono ili atmosfersko. Komutacioni prenaponi nastaju usled komutacionih radnji na mreži i mogu biti multiplicirani u skladu sa jednačinama telegrafičara u tačkama u kojima se vrši odbijanje talasa. Atmosferski prenaponi nastaju direktnim ili udarom groma u dalekovode (brzine veće od brzine reagovanja prenaponske zaštite) ili indirektnim (koji indukuje prenapone). Svi prenaponi putuju po mreži, odbijaju se u tačkama koje nisu zatvorene karakterističnom impedansom, superponiraju se i mogu dostići amplitude i brzine koje ulaze u sve komponente priključene na mrežu i delovati destruktivno. Napreznje impulsnim naponom je stohastična pojava koja se javlja kao posledica pojave komutacionih i atmosferskih prenapona u elektroenergetskom sistemu.

Sva napreznja naponom ne dovode promptno do proba izolacije. Međutim, po pravilu, proba izolacije započinje pojavom parcijalnog pražnjenja. Parcijalno pražnjenje se javlja prvo na mestima nesavršenosti izolacije, kao što su šupljine, nečistoće sintetskog materijala, mehaničke nepravilnosti u graničnom ili kontinualnim slojevima vode. Parcijalno pražnjenje stvara efekte granjanja u izolaciji i dovodi do konačnog proba izolacije. Na izolaciju namotaja i njihovo trajanje najveći uticaj ima temperaturno i mehaničko napreznje. Ipak najveći efekat na razaranje izolacije dovodi parcijalno napreznje i naponsko napreznje koje je veoma izraženo na mestima na kojim je došlo, tokom tehnološkog postupka do savijanja i uvrtnja. Tokom tih postupaka, koji se odvijaju automatski, dolazi do oštećenja izolacionih i provodnih delova. Ova oštećenja dovode do nenormalne

raspodele struje što vodi ubrzanom starenju namotaja [47 - 49]. Na slici 2.3 prikazana je pojava parcijalnog pražnjenja na kanuri obrtne električne mašine u pogonu.



Slika 2.3 - Pojava parcijalnog pražnjenja na kanuri obrtne električne mašine u pogonu

Sa aspekta starenja izolacije statora električne mašine interesantna je i promena frekvencije naizmennog napona kojim se mašina napaja. Naime, promena (porast) frekvencije naizmennog napona izaziva porast temperature izolacionog materijala (usled frekventne zavisnosti dielektrične konstante). To zagrevanje dovodi do pojave i povećanja parcijalnog pražnjenja koje bitno utiče na starenje izolacije.

Mehanička naprezanja izolacije dovode do zamora materijala i ubrzanog starenja. Do mehaničkog naprezanja izolacije statora obrtnih mašina dolazi usled: elektromagnetnih sila, debalansa rotirajućih delova i uslova pogona (uključenja). Ova naprezanja rezultiraju zamorom materijala i brzog starenja koje raste srazmerno gabaritu mašine. Ispitivanje uticaja mehaničkog naprezanja na izolaciju statora obrtnih električnih mašina uglavnom se odnosi na otkrivanje slabih mesta izolacije na osnovu čega se vrlo malo može zaključiti o starenju izolacije. Najveći deo publikovanih rezultata se odnosi na mehaničke stresove. Takođe ne postoji dovoljno objavljenih podataka o ubrzanju starenja sa povećanjem frekvencije elektromagnetnog naprezanja (dvostruke frekvencije naizmennog napona) [51, 52].

Na slici 2.4 prikazana je pojava naprslina na provodniku kanure usled mehaničkog naprezanja.



Slika 2.4 - Oštećena kanura usled mehaničkih oscilacija



Ambijentalna naprezanja predstavljaju najrazličitije uticaje neposrednog okruženja u kojem rade električne mašine. Najčešći oblici ambijentalnog naprezanja su: vlaga (vlažan ambijent, kondenzacija vodene pare ...), hemijski agresivna sredina (rastvorene soli i kiseline) i radioaktivno zračenje ( $\gamma$ -zračenje i n-zračenje). Naravno, u specifičnim pogonskim uslovima javljaju se i druge vrste ambijentalnog naprezanja [53].

Sve električne mašine u pogonu su podvrgnute sinergijskom naprezanju. Električni stresovi, temperatura izazvana toplotnim gubicima u provodniku i dielektriku, mehanički stresovi i ambijentalni efekti deluju (i međudeluju) vršeći degradaciju izolacije statora obrtne električne mašine. Složenost problema komplikuje još i postojanje sinergijskih efekata koji se ne mogu predvideti bez eksperimentalnog ili pogonskog iskustva. Tu situaciju komplikuje činjenica da različiti materijali mogu čak suprotno da se ponašaju pod potpuno istim uslovima ispitivanja. Destruktivne metode ispitivanja ponašanja izolacije statora obrtnih električnih mašina utvrđuju slabe tačke izolacije, a nedestruktivne metode utvrđuju ponašanje izolacije. Obe ove metode omogućavaju predviđanje starenja izolacije statora obrtnih električnih mašina u uslovima kombinovanog naprezanja.

### 2.3. Zapaženiji rezultati do sada objavljeni na temu procene ostatka veka trajanja izolacionog sistema obrtne električne mašine

U dostupnoj literaturi postoji brojni radovi u kojima se autori bave starenjem izolacije električnih mašina pod uticajem nekih od pomenutih naprezanja [54-63]. U okviru doktorske disertacije je ispitivan i uticaj radioaktivnog zračenja (neutronske i gama) na preostali životni vek obrtne mašine. Ovaj aspekt je nedovoljno istražen, a perspektivno je veoma važan zbog planiranog povratka nuklearnih reaktora za proizvodnju električne energije. Obično se posmatra jedan ili dva dominantna tipa naprezanja pri čemu se sinergija ovih naprezanja tretira aditivno i ne vrši se provera opravdanosti pretpostavke o aditivnosti<sup>1</sup>. Zaključci koje autori daju su nesumnjivo korisni ali su

---

<sup>1</sup> Kako je svako ispitivanje slučajnog karaktera, dobijenim rezultatima se pridružuje određena raspodela verovatnoće. Naime, pri obradi dobijenih rezultata, često se postavlja pitanje koji model odabrati, tj. iz koje teorijske raspodele potiču rezultati merenja. Jedan od problema koji se odnosi na dobijeni skup slučajnih promenljivih je da se pronađe model raspodele verovatnoće koja će dobro uklapati te podatke. Pri tome, u mnogim slučajevima merna veličina (izlazna veličina) se ne meri direktno već se određuje kao funkcija od velikog broja drugih veličina (ulazne veličine). Tako, u slučaju slučajnih promenljivih od interesa u ovom radu, postoji sledeći skup ulaznih veličina i njima pridruženih funkcija gustine raspodele: 1) vlaga – ravnomerna raspodela; 2) broj impulsa – normalna raspodela; 3) temperatura – ravnomerna raspodela; 4) vreme – esponencijalna raspodela; 5) tangens ugla gubitaka – normalna raspodela; 6) prag parcijalnog pražnjenja – troparameterska Vejbulova raspodela; 7) oštećenje provodnika – Poasonova raspodela; 8) oštećenje izolatora – beta raspodela. Da bi se primenila metoda prostiranja raspodele verovatnoće, potrebno je formulisati model merenja. U slučaju linearnih ili linearizovanih modela, gde su ulazne veličine nezavisne, najčešće se radi o mešovitim raspodelama aditivnog tipa ili multiplikativnog tipa. Međutim, već za disperziju mešovite raspodele aditivnog tipa se dobijaju prilično komplikovani analitički izrazi. Pogotovo ako je nekoj slučajnoj promenljivoj pridružena ravnomerna raspodela (sto praktično znači da raspodele nema)

Na primer, ako se razmatraju samo dve ulazne veličine koje imaju normalne raspodele (u ovom slučaju broj impulsa i tangens ugla gubitaka), izlazna veličina će imati normalnu raspodelu koja ima 5 nepoznatih parametara (srednje vrednosti prve i druge normalne raspodele, standardne devijacije prve i druge normalne raspodele, obim prvog uzorka). Za njihovo određivanje analitičkim putem potrebno je rešavati sistem od 5 nelinearnih jednačina. Drugi način njihovog određivanja je metodom maksimalne verodostojnosti. U oba slučaja, rešavanje je vrlo komplikovano. U prvom slučaju se komplikovani sistem nelinearnih jednačina mora rešavati numeričkim postupcima, a drugi način se svodi na određivanje maksimuma nelinearne funkcije koja zavisi od 5 nezavisnih promenljivih što, takođe, nije jednostavan zadatak. Problem takozvanog mešanja sedam raspodela i njihova linearizacija nije do sada rešen (do sada su mogle da se mešaju samo četiri raspodele istog tipa ili iz porodice istog tipa), iz tog razloga se može reći da je neosnovano tvrđenje da su prethodno pobrojane slučajne veličine aditivnog tipa, te se ne mogu tako ni tretirati.

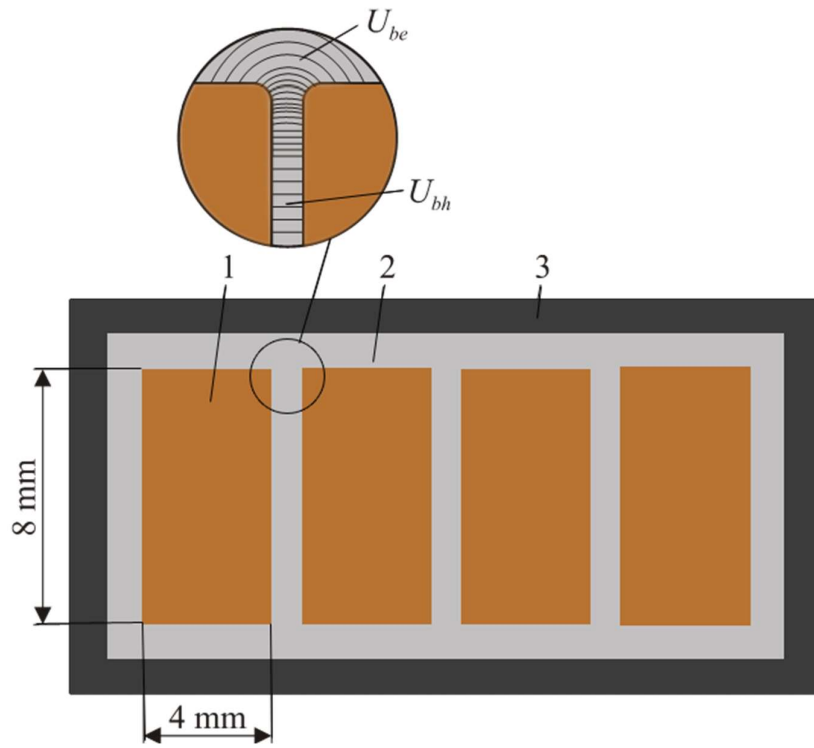
S druge strane, mešovite raspodele multiplikativnog tipa prirodno nastaju kod problema određivanja raspodele maksimuma ili minimuma konačnog skupa nezavisnih slučajnih promenljivih (raspodele ekstermalnih statistika). Često se koristi u teoriji pouzdanosti.

Prethodno opisani načini spadaju u analitičke metode koje matematički opisuju funkciju gustine raspodele za izlaznu veličinu. Pri tome, analitičke metode su idealne tamo gde nije potrebno uvesti neku aproksimaciju, tj. primenljive su samo za jednostavnije slučajeve. Metoda Monte Karlo (MCM) je jedna od numeričkih metoda koja obezbeđuje prostiranje raspodele. Naime, određivanje funkcije gustine raspodele izlazne veličine zahteva izračunavanje višedimenzionalnih integrala, što može, obično, da se uradi numeričkim aproksimacijama. Metoda Monte Karlo je upravo najpogodnija za ovaj zadatak.

isključivo kvalitativne prirode. Pored toga autori se pretežno fokusiraju na jedan ili dva elementarna parametra izolacije, a druge zanemaruju. Tako na primer u radu [61] autori smatraju relevantnom karakteristikom starenja izolacije statorskog namotaja električne mašine isključivo tangens ugla gubitaka i ne daju nikakav kvantitativan parametar koji bi mogao pomoći da se odredi ostatak veka trajanja električne mašine na osnovu njihovih ispitivanja. U radu [62] se ispituje termičko, električno i mehaničko naprezanje izolacije električne mašine takođe bez uzimanja u obzir sinergije ovih naprezanja. Pored toga ovom, nesumnjivo dobrom, radu može se zameriti nedostatak matematičko-statističkog modela koji bi omogućio kvantitativno predviđanje ostatka veka trajanja pod dejstvom posmatranih naprezanja (u statističkom smislu – ovo treba podrazumevati kod većine iznesenih tvrdnji u ovom radu jer je posmatrana problematika stohastičke prirode). Veoma je interesantan rad koji se bavi kvalitativnom analizom i predviđanjem starenja električnih mašina uz upotrebu novih izolacionih materijala i novih tipova navoja. Kao zamerku ovom radu se može ukazati da ne postoje podaci o dugovremenskoj upotrebi takvih mašina pa samim tim ne postoji mogućnost verifikacije prikazanih rezultata. Rad [63] je svakako koristan rad, ali ima isti nedostatak kao rad [61], naime autori su se fokusirali samo na jedan parametar dijagnostike izolacije. Oni posmatraju efekte naprezanja na parcijalno pražnjenje (što je svakako ilustrativnije nego tangens ugla gubitaka ali ipak nedovoljno). Svi ovi radovi su manjkavo statistički obrađeni i u njima nije izražena merna nesigurnost eksperimentalnog postupka.

Pored navedenih radova postoji i dosta drugih radova koji imaju slične ili iste nedostatke. Za razliku od pristupa u tim radovima, u predloženoj doktorskoj disertaciji će biti ispitivani svi relevantni očekivani tipovi naprezanja. Takođe će se u okviru predložene disertacije posmatrati sinergija raznih tipova naprezanja za koju se sa velikom verovatnoćom može tvrditi da nije aditivnog tipa. Kao najveći napredak ispitivanja starenja električnih mašina u uslovima eksploatacije koji sadrži predloženi doktorat treba istaći razvoj algoritma za kvantitativno predviđanje ostatka životnog veka izolacije statorskog namotaja obrtnih električnih mašina u pogonu. Pored toga, za sve sprovedene eksperimente u okviru izrade doktorske disertacije biće definisan budžet merne nesigurnosti i izražena kombinovana merna nesigurnost.

Tako je u radu pokazano da najbrže stare delovi koji su prilikom tehnološkog postupka izrade pretrpeli naprezanje na uvrtnje. U tom radu [36] je takođe pokazano da parcijalno pražnjenje nastaje (u nešto manjem intenzitetu) i to je objašnjeno efektom povećanja električnog polja na sendvič strukturi gotove kanure, kada dođe do pomeranja i oštećenja provodnih traka prilikom savijanja i uvrtnja kanure tokom tehnološkog postupka [20].



Slika 2.5 - Raspodela električnog polja na poprečnom preseku gotove kanure dobijena metodom simulacije naelektrisanja uz izdvojen deo velikog povećanja polja usled ivičnog efekta [24]

### 3. PLANIRANJE I OBRADA REZULTATA EKSPERIMENTA

Fizičke veličine su se dugo delile na determinističke i stohastičke. Ta podela je trajala do napuštanja teorije greške i uvođenja teorije merne nesigurnosti. Prema teoriji izražavanja merne nesigurnosti, uslovno, sve veličine su stohastičke. Naravno metrolozi, u svome diskursu, dalje smatraju da postoje i determinističke veličine, ali im sada pripisuju mernu nesigurnost TipA jednaku nula. Čitava ova gimnastika ima smisla pošto stohastičke veličine imaju prirodu verovatnoće i problem njihovog određivanja je veliki. To se posebno odnosi na jako male kvantile verovatnoće i jako velike kvantile verovatnoće (na primer da se odredi veličina kvantila verovatnoće 0.1 % potrebno je 100000 merenja (i tada je statistička sigurnost 10 %). Iz toga razloga se stohastičkim veličinama pridružuju statističke raspodele koje omogućavaju da se stohastičke veličine matematički tretiraju. Treba napomenuti i to da određivanje malih vrednosti kvantila verovatnoće koristeći unificirane statističke raspodele unosi statističku nesigurnost koja nije nužno zanemarljiva. Razlog za to je što funkcija statističke raspodele dobijene na osnovu pedeset rezultata stohastičkih merenja (što se često uzima kao minimalni broj slučajnih promenljivih potrebnih za formiranje reprezentativnog statističkog uzorka, prema Studentovom testu) teško da može da sadrži i jednu eksperimentalno dobijenu tačku tog kvantila verovatnoće. Prema tome takav rezultat se svodi na čistu ekstrapolaciju sa svim nedostacima koju ona unosi u statistički proračun. I pored tog nedostatka, to je jedini neeksperimentalni postupak koji se može koristiti. Ne treba nenaglasiti da bi i sam eksperimentalni postupak za određivanje tako malih vrednosti kvantila veličine pošto bi ogroman broj merenja, prema samoj prirodi metrologije, nužno doveo do ireverzibilnih rezultata mernog postupka.

Statistički postupci daju osnov i smernice vršenja stohastičkih eksperimenata. Statistički postupci, pored toga sto daju osnov za koncipiranje stohastičkih eksperimenata, omogućavaju i obradu tako dobijenih rezultata pri čemu im se pridružuje statistička sigurnost (statistička sigurnost, ili njoj komplementarna statistička nesigurnost daje podatak o tome sa kojom je zaključak dobijen statističkom analizom pouzdan). Postupci matematičke statistike su metode pomoću kojih se koncipiraju merni postupci i obrađuju njima dobijeni rezultati. Matematička statistika je isto tako postupak, koji omogućava formiranje modela i procenu pouzdanosti mernog algoritma tokom čijeg primenjivanja na ispitivanju manifestuju stohastički ishodi. Međutim, da bi se primenila matematička statistika mora se raspolagati statističkim uzorkom od dovoljnog broja slučajnih promenljivih. Statistički uzorci, i slučajne promenjive koji ih čine, moraju biti pažljivo testirani da bi se na njih mogla primeniti metoda matematičke statistike. Testovi koji se primenjuju u okviru statističke matematike su njen sastavni deo. Bez statističkih testova primena statistike bi bila neprimenjiva za složenije probleme. U ovom poglavlju će biti razmatrane primene teoretskih postupaka matematičke statistike vezanih namenski za tehničku oblast koja je tema ovog rada.

#### 3.1. Statistička obrada eksperimentalnih rezultata

Kao sto je rečeno statistički uzorak čini skup stohastičkih merenja od kojih svako za sebe čini slučajnu promenljivu. To je razlog da se posebna pažnja posveti testiranju statističkih uzoraka i odgovarajućih slučajnih veličina. U tom cilju se svaki ishod eksperimenta tretira stohastičkim događajem, a svako merenje slučajnim merenjem.

Slučajno merenje, u najopštijem pojmu, je merenje čiji je rezultat neizvestan pod određenim okolnostima pod kojim se merenje vrši i za koji ne postoji ograničenje broja ponavljanja. Naravno tu se podrazumevaju kontrolisani uslovi pod kojim se vrše eksperimenti.

Posledice su stohatičke prirode merene veličine, tj. slučajni ishodi merenja koji se javljaju tokom slučajnog eksperimenta. Ako slučajni eksperiment nije korektno organizovan, statistički uzorci slučajnih veličina dobijeni njime su neupotrebljivi (što znači da se dobijeni slučajni ishodi merenja ne mogu obuhvatiti nekom statističkom funkcijom). Ako se dobijeni slučajni rezultati

merjenja obuhvatljivi nekom statističkom funkcijom, oni čine statistički uzorak koji se smatra korektnim i na njega se mogu primeniti sve metode matematičke statistike. On je statistički i u tom smislu što može da se objedini matematičkom veličinom koja se zove statistička funkcija raspodele.

Statistička funkcija raspodele (skraćeno: funkcija raspodele) se definiše kao verovatnoća da u tački  $x$  slučajna veličina ima vrednost manju od  $x$ . Statistička funkcija raspodele je određena odgovarajućim parametrima. Parametri se koriste da definišu suštinu funkcije raspodele. Postoji razlika između opštih parametara koji se odnose na funkciju raspodele (funkcionalni parametri) i parametara koji se eksplicitno javljaju u izrazu za teoretsku funkciju raspodele (parametri raspodele). Ova dva tipa parametara su matematički povezani. Statistička funkcija raspodele se prikazuje analitički ili grafički, zavisno od dalje obrade, odnosno namene. Praktično je ipak, a i najcelishodnije statističku funkciju raspodele prikazati na oba načina. Grafičko prikazivanje funkcije raspodele je, u inženjerskoj praksi, vrlo uobičajeno iz razloga prednosti njihove očiglednosti. Analitički funkcija raspodele se prikazuje ili preko gustine funkcije raspodele ili preko kumulativne krive (koja je na odgovarajućem papiru verovatnoće prava). Pored toga česta je u upotrebi i funkcija izvodnica (zavisnost empirijski dobijene verovatnoće od nezavisne promenljive). Funkcija izvodnica se često brka sa kumulativnom funkcijom statističke raspodele pošto slično izgledaju.

Odstupanje između teoretskih i empirijskih raspodela određuje se odgovarajućim testovima. U praksi je često potrebno kombinovati numeričke i grafičke testove. Najvažnije je naglasiti da je rezultat testa utoliko bliži stvarnosti ukoliko je, pod uslovom nezavisnosti postupka testiranja, statistički uzorak što veći (ujedno i isključena svaka pojava ireverzibilnost mernog postupka). Veličina statističkog uzorka dovoljna za pouzdane statističke uzorke određuje se studentovim  $t$  testom (naravno imajući u vidu prethodni uslov vezan za ireverzibilnost postupka merjenja).  $T$  test ima nezamenjivu ulogu u oceni intervala poverenja. U ovom radu je korišćen  $t$  test u njegovom racionalnom obliku sa aspekta primene u tehnici. To znači da je ispitivanja minimalne veličine statističkog uzorka, a u skladu sa  $t$ -testom, uzimano je 50 ili 100 slučajnih promenljivih koje su kasnije testirane na sledeći način (statistički uzorak primenjivan u ovom radu je bio veći pošto je vršeno više ispitivanja usled metode statističke obrade i kao posledica odbacivanja nepouzdanih uzoraka je broj prikazanih slučajnih promenljivih često bio veći): 1) primenom modifikovanog Šoveneovog (izvršena je potrebna modifikacija za asimetričnu raspodelu koja se sastojala iz veštački svođenja trećeg centralnog momenta na nulu, vršenje testa i odbacivanje nestvarnih slučajnih promenljivih kojim je treći centralni momemat anuliran kao i slučajnih promenljivih ubačenih u kontrolnu svrhu) kriterijuma iz svakog uzorka su odstranjene nepouzdate, tj. sumnjive vrednosti odgovarajuće slučajne promenljive. Pošto Šoveneov kriterijum za odbacivanje sumnjivih slučajnih promenljivih važi, strogo uzevši, samo za Normalnu raspodelu, a priroda merenih slučajnih promenljivih pre ukazuje da one pripadaju nekoj od statističkih raspodela ekstremnih vrednosti pa je bilo nužno primeniti modifikovani Šoveneov kriterijum [64]; 2) testiranje slučajnih promenljivih svih dobijenih statističkih uzoraka grafičkim testom,  $\chi^2$  testom i Kolmogorov testom na pripadnost Normalnoj raspodeli, dvoparametarskoj i troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli i duploeksponencijalnoj raspodeli; 3) za raspodele za koje je utvrđeno da im testirane slučajne promenljive pripadaju sa najmanjom vrednošću statističke nepouzdanosti određivani su parametri metodom centralnih momenata i metodom maksimalne verodostojnosti; 4) za sve raspodele slučajnih promenljivih za koje su određeni parametri, određen je i koeficijent varijacije (za korake 3 i 4 korišćen je komercijalni računarski program); 5) za sve statističke uzorke od po 100 realizacija slučajnih promenljivih izvršena je hronološka podela po pet statističkih poduzoraka od 20 slučajnih promenljivih na koje je primenjen  $U$ -test statističke pouzdanosti 5 % da se utvrdi da li sve slučajne promenljive jednog statističkog uzorka pripadaju jedinstvenom statističkom uzorku. Isto je rađeno ako je broj slučajnih promenljivih u statističkom uzorku bio 50, tj. on je deljen na 5 poduzoraka sa po 10 hronoloških slučajnih promenljivih i testiran  $U$ -testom. Tako formiran statistički uzorak ispunjava sve uslove da se na njega primene metode matematičke statistike; 6) za sve parove statističkih uzoraka (tj. za statistički uzorak slučajne promenljive određen za jedan određen kontrolni set kanura i odgovarajući statistički uzorak određen za celu kanuru) određeni su koeficijent korelacije

i regresione prave primenom robusnog kriterijuma (prilog 2: korelacione i regresione krive); 7) na osnovu prethodno dobijenog rezultata o primenjivosti zakona porasta verovatnoće pod uslovima eksperimenta na sve statističke uzorke slučajnih promeljivih određene za kontrolne setove kanura korigovane su vrednosti slučajnih promenljivih primenom modifikovanog (diskretnog) zakona porasta verovatnoće nakon čega su im dodate slučajne promenljive određene za odgovarajuću slučajnu promenljivu za ceo stator (pri čemu su svi statistički uzorci slučajnih promenljivih korigovani primenom robusnog kriterijuma); 8) proverena je primenjivost zakona porasta verovatnoće posmatrajući jednu kanuru kao osnovni sistem ( $n=1$ ), a ostale statističke uzorke kao uvećane sisteme (dve kanure ( $n=2$ ), tri kanure ( $n=3$ ), četiri kanure ( $n=4$ ), pet kanura ( $n=5$ ) i ceo stator obrtne mašine ( $n=50$ )); 9) tako dobijen statistički uzorak od hiljadu slučajnih promenljivih na statističke uzorke od sto slučajnih promenljivih pri čemu se vodilo računa o istom postupku dobijanja i hronologiji i 10) skup od deset tako dobijenih statističkih uzoraka od po sto slučajnih promenljivih testiran je U-testom statističke pouzdanosti 5% .

### **3.2. Opimizacija koncepcije mernog postupka, veličina eksperimenta i korišćene opreme**

Eksperimentalno određivanje funkcija raspodela slučajnih uzoraka koji određuju izolaciona svojstva (probojni napon, kritično polje, dielektrična čvrstina, itd.) pružaju podatke i o izolaciji koja se može koristiti pod određenim uslovima. Iz toga sledi logičan zaključak da tokom takvih ispitivanja naponska i druga naprezanja treba da budu približna onima kojim će izolacija biti opterećena tokom eksploatacije. To znači da slučajnu prirodu ne smeju imati opterećenja, već samo ponašanje izolacije. To je osnovni postulat stohastičkih merenja pošto bi njegovo nepoštovanje dovelo do narušavanja jedinstvenosti prirode posmatrane slučajne promenljive.

Ovde se opet javlja problem uticaja istorije mernog postupka na jednoobraznost slučajnih veličina. Poznato je pravilo da je merenje moguće samo uz interakciju merene veličine i mernog sistema. Ta interakcija mora biti minimalna, ali nikada ne može biti nula. Takozvana beskontaktna merenja mogu imati značajan uticaj između merene veličine i mernog sistema. To nikada ne sme da bude zaboravljeno ni isključeno iz analize dobijenih rezultata. To znači da ne postoje apsolutni ireverzibilni postupci merenja. Da bi se reverzibilnost jedne serije merenja minimizirala stohastički eksperimentalni postupak treba organizovati tako da proizvodi minimalne reverzibilne promene, što u praksi često znači da treba minimizirati energetska razmena tokom merne interakcije. To povećava troškove izrade uzoraka, ispitivanje uzoraka, ispitna postrojenja i osoblje koje vrši ispitivanje, znatnim. Stoga, kada se vrši merenje parametara testa, treba posebnu pažnju obezbediti za: 1) interkomparaciju laboratorijskih testovima sa odgovarajućim testovima drugih laboratorija i 2) opštoj primenjivosti dobijenih rezultata odgovarajućim promenama parametrima testa i dovoljno velikom statističkom uzorku koji trpi i odbacivanje delova statističkog uzorka ako iskažu neku ireverzibilnost tokom eksperimentalnog postupka.

Karakteristike od interesa izolacionih materijala ukazuju na njihova najslabija mesta a onda odgovarajuće statističke funkcije moraju pripadati statističkim funkcijama ekstremnih vrednosti, tj. vrednostima pri kojim se gube (trajno ili privremeno) izolaciona svojstva. Osnovna statistička raspodela ekstremnih vrednosti je troparametarska Vejbulova raspodela (iz koje su izvedene sve ostale statističke raspodele ekstremnih vrednosti) sva razmatranja statističkih pojava u ovom radu biće pretežno povezana sa Vejbulovom raspodelom. Naravno pored Vejbulove raspodele biće i neke druge raspodele predmet interesovanja, kao i normalna raspodela pošto je ona osnovna mera odstupanja raspodela od prirodno očekivanih. Osobina raspodela ekstremne vrednosti je različitost od nule trećeg centralnog momenta. Posledica toga je asimetrija svih raspodela ekstremne vrednosti. Asimetrija raspodela ekstremnih vrednosti je posledica nepostojanja suprotnih efekata koji za posledicu imaju simetriju raspodele (na primer postojanje jakih i slabih mesta izolacije koja bi se

uravnotežila - naravno jaka mesta izolacije sigurno postoje, ali se ne uravnotežavaju sa slabim mestima). [65, 66]

### 3.3. Vejbulova statistička raspodela

Po Normalnoj raspodeli se ponašaju slučajne promenljive koje imaju podjednaku verovatnoću da se poboljšaju i pogoršaju (tj. da im vrednost poraste ili opadne). Iz tog razloga je Normalna raspodela simetrična, odnosno ima treći centralni momenat jednak nuli. Normalna raspodela je direktna posledica Centralne granične teoreme i najviše odgovara procesima koji se odigravaju u prirodi, pošto je priroda uravnotežena dejstvima u smeru promene (koliko se menja u jednom smeru, toliko se menja i u drugom). Međutim u tehnici se javlja niz veličina koje mogu samo da poboljšavaju svoje odgovarajuće veličine, što je retko, ili da pogoršavaju svoje odgovarajuće slučajne veličine, što je češći slučaj. Statističke raspodele po kojima se ponašaju takve slučajne veličine nazivaju se raspodelama ekstremnih vrednosti. Osnovna statistička raspodela ekstremnih vrednosti je Vejbulova raspodela. Iz nje proističu sve ostale raspodele ekstremnih vrednosti. Više puta je naglašeno, i diskutovano sa različitih aspekata, da je karakteristika raspodele ekstremnih vrednosti da različitost od nule trećeg centralnog momenta (koji je kod Normalne raspodele obavezno jednak nuli). Razlika, trećeg centralnog momenta od nule, mera odstupanja svih tipova statističkih raspodela ekstremnih vrednosti od Normalne raspodele. Svaka od raspodela ekstremnih vrednosti ima ishod koji je ekstremna vrednost od svih potencijalnih ishoda.

Statističke raspodele ekstremnih vrednosti dobijaju se na pretpostavci uzimanja vrednosti  $n$  slučajnih događaja sa verovatnoćom  $p$  i sa slučajnim promenljivim  $X_j$ , koje su sve jednako raspodeljene sa statističkom raspodelom  $F_A(x)$ . Tada se slučajna promenljiva  $H$  određuje iz skupa minimuma svih mogućih  $X = \min(X_j)$ .

Na osnovu uslova multiplikacije nezavisnih verovatnoća sledi za nepojavljivanje događaja  $H$  tj.  $P(X \geq x) = [1 - F_A(x)]^n$ , a za njegovo pojavljivanje, a samim tim i za funkciju raspodele slučajne promenljive  $H$ :

$$F_n(x) = P(X < x) = 1 - [1 - F_A(x)]^n \quad (3.1)$$

Da bi se dobila funkcija ekstremnih vrednosti koristi se granične promene  $n \rightarrow \infty$ , a na osnovu istovremene konvergencije  $F_A(x) \rightarrow 0$ :

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ F_A(x) \rightarrow 0}} \{1 - [1 - F_A(x)]^n\} = F(x) \quad (3.2)$$

Koji tip od funkcija raspodela ekstremnih vrednosti ce biti rezultat ovog graničnog procesa ovisi od  $F_A(x)$ , tacnije od početne raspodele. Pri tome treba naglasiti da samo neke  $F_A(x)$  mogu uslovno ispunjavati sve uslove funkcije raspodele. Iz razloga granicnog ponasanja, interesantne su jedino one kada je u blizini  $F_A(x) \rightarrow 0$ . Taj uslovje ispunjen samo ako funkcija raste na desno, tj.  $F(x_0) = 0$  i  $F(x_0 + \varepsilon) > 0$  za  $\varepsilon > 0$ . Ovaj uslov ispunjava veliki broj funkcija. Ipak se pokazuje da sa bilo kojom funkcijom  $F_A(x)$  mogu se dobiti samo tri tipa raspodele ekstremnih vrednosti:

- Tip I (u slučaju primene na problem najmanje vrednosti, raspodela je neograničena, to je duplo-eksponencijalna raspodela);
- Tip II (ograničena sa gornje strane, neograničena sa donje strane, nikada se ne primenjuje u elektroenergetici);
- Tip III (ograničena sa gornje strane, neograničena sa donje strane, u slučaju primene na probleme minimuma, to je Vejbulova raspodela koja se najčešće primenjuje u energetici) [66];

Vejbulove raspodjele se najčešće prikazuje u obliku  $F_A(x) = \frac{1}{n} \left( \frac{x - x_0}{\eta} \right)^\delta$ , gde su  $x > x_0$ ,  $\eta > 0$ ,  $\delta > 0$ .

Funkcija gustine Vejbulove raspodele je:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\delta}{\eta} \left( \frac{x - x_0}{\eta} \right)^{\delta-1} \exp \left[ - \left( \frac{x - x_0}{\eta} \right)^\delta \right], & x > x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Funkcija raspodele:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - x_0}{\eta} \right)^\delta \right], & x > x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (3.4)$$

gde su parametri::

- $\eta = x_{63} - x_0$  - 63%-ni kvantil dvoparametarske raspodele;
- $\delta$  - Vejbulov eksponent, mera disperzije raspodele;
- $x_0$  - početna vrednost.

Ovde treba naglasiti da je troparametarska Vejbulova raspodela kao stvorena za slučajnu promenljivu probojni napon (a time i slučajnu promenljivu prag parcijalnog pražnjenja). Ona parametrom  $x_0$  definiše minimum slučajne promenljive, skalirajucim parametrom  $\delta$  definiše rasipanje slučajne promenljive, a parametrom  $\eta$  definiše asimetriju slučajne promenljive.

Za  $x_0 = 0$ , dvoparametarska Vejbulova raspode se dobija iz troparametarske raspodele. Zato što su  $x_0 = 0$  i  $\delta = 1$ , eksponencijalna raspodela ima samo jedan parametar, obično označen sa  $\lambda$  ( $\lambda = 1/\eta$ ).

Očekivanje:

$$EX = x_0 + \eta \Gamma \left( \frac{1}{\delta} + 1 \right) \quad (3.5)$$

gde je  $\Gamma(1/\delta + 1)$  gama funkcija koja se nalazi u računarskim datotekama koje ih generišu.



Tabela 3.1: Tačkaste ocene parametara Vejbulove raspodele [66]

Parametar	Tačkasta ocena	Pomoćna veličina, objašnjenje	
a) Vejbulov eksponent $\delta$	$\delta^* = \frac{\pi}{\sqrt{6} s_y} M$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i - x_0)$	Početna vrednost $x_0$ poznata
63%-ni kvantil $\eta$	$\eta^* = \exp\left(\bar{y} + \frac{C}{\delta^*}\right)$	$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(x_i - x_0) - \bar{y})^2}{n-1}}$ $M =$ korekcionni faktor koji zavisi od veličine uzorka ( $\lim_{n \rightarrow \infty} M = 1$ ) $C = 0,577226$ Euler-ova konstanta	
b) 63%-ni kvantil $\eta$	$\eta^* = \frac{s}{g_b}$	$\bar{x} =$ aritmetička sredina $s =$ srednje kvadratno odstupanje	Vejbulov eksponent $\delta$ je poznat; $\delta \geq 1$
Početna vrednost $x_0$	$x_0^* = \begin{cases} x_l & \text{za } x_l < x_{min} \\ x_{min} & \text{za } x_l \geq x_{min} \end{cases}$	$g_b =$ korekcionni faktor koji zavisi od Vejbulovog eksponenta $\delta$	
Vejbulov eksponent $\delta$ je poznat, ali $\delta < 1$	$x_0^* = x_{min}$ je ocenjeno i $\eta$ je određeno metodom maksimalne verodostojnosti	$k_b =$ korekcionni faktor koji zavisi od Vejbulovog eksponenta $\delta$ $x_l = \bar{x} - \eta^* k_b$ $x_{min} =$ minimalan ishod u uzorku	
c) Vejbulov eksponent $\delta$	odgovarajuća tabelarna vrednost $\delta$ je određena kao ocenjena vrednost	$\bar{x} =$ aritmetička sredina $s =$ srednje kvadratno odstupanje	Sva tri parametra su nepoznata
63%-ni kvantil $\eta$	$\eta^* = \frac{s}{g_b}$	$g = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$ $s^3$	
Početna vrednost $x_0$	$x_0^* = \bar{x} - \eta^* k_b$	empirijska asimetrija $k_b, g_b, y_b$ tabelarne vrednosti koje zavise od Vejbulovog eksponenta $\delta$	

$$\eta^* = x_{63} \quad (3.6)$$

$$\delta^* = \frac{\log\left(\ln\frac{1}{1-F(x_1)}\right) - \log\left(\ln\frac{1}{1-F(x_2)}\right)}{\log\left(\frac{x_1}{x_2}\right)} \quad (3.7)$$

i sa posebnim kvantilima  $x_{63}$  i  $x_{05}$ :

$$\delta^* = \frac{1,2898}{\log\left(\frac{x_{63}}{x_{05}}\right)} \quad (3.8)$$

$F(x_1)$  i  $F(x_2)$  su redovi (tj. vrednosti funkcije raspodele) za empirijske kvantile  $x_1$  i  $x_2$ .

Druge tačkaste ocene nastaju kao rezultat metode centralnih momenata (tabela 3.1 parametar pod a) ili metode maksimalne verodostojnosti. U slučaju da je poznat Vejbulov eksponent, postupak centralnih momenata stvara mogućnost ostala dva parametra ( $\eta$  i  $x_0$ ) za  $\delta \geq 1$ , dok metod maksimalne verodostojnosti treba da se koristi za  $\delta < 1$  [66 - 68].

### 3.4. Mann–Whitney test, U-test (Wilcoxonov test sume rangova)

Test je kao pojam uveden u upotrebu da bi omogućio dobijanje odgovora na pitanje da li nešto jeste ili nije odnosno odgovor može biti samo jedan od komplementarnih izraza, jeste ili nije. Pitanje na koje se testom odgovara naziva se hipotezom. Ovde je važan U-test pošto je korišćen u radu. U-test spada u neparametarske testove i služi za testiranje centralnih vrednosti dve populacije (ili više) koje su prema hipotezi potpuno jednake. Statistika testa se formira na taj način što se vrši kombinovanje uzoraka, koji se rangiraju i vrše posmatranja u kombinovanom uzorku pri čemu se sumiraju rangovi posmatranja u kombinovanom uzorku, a sumirani rangovi posmatraju se kao delovi jedinstvenog uzoraka. Test je predviđen za poređenje dva nezavisna uzorka koji nisu normalno raspoređeni pri čemu nije i obavezno, da uzorci pripadaju istoj raspodeli [66 - 68].

#### 3.4.1. Procedura U-testa

*Hipoteza:* Funkcije raspodele  $F(x)$  i  $F(y)$  dveju populacija, koje se predstavljaju s dva statistička uzorka veličina  $n_x$  i  $n_y$  i s slučajnim promenljivim  $x_1 \dots x_i \dots x_{n_x}$  i  $y_1 \dots y_i \dots y_{n_y}$ , su identične:  $F(x) = F(y)$ .

*Statistika testa:*  $(n_x + n_y)$  vrijednosti uzoraka je istovremeno poređano po veličini i numerisano od 1 do  $(n_x + n_y)$ . Brojevi imenovani rangovima  $r(x_i)$  i  $r(y_j)$ , a istim vrednostima ranga identifikuje se ishodom. Nakon toga se suma rangova izražava za svaki uzorak:

$$R_x = \sum_{i=1}^{n_x} r(x_i) \quad \text{za} \quad R_y = \sum_{j=1}^{n_y} r(y_j), \quad (3.9)$$

na osnovu čega se određuje statistika testa:

$$u = \min(u_x, u_y) \quad (3.10)$$

pa sledi:

$$u_x = R_x - \frac{n_x(n_x + 1)}{2}; \quad u_y = R_y - \frac{n_y(n_y + 1)}{2}$$

*Kritična vrednost:* Kritična vrednost  $U_{n_x, n_y; \alpha}$  je data u tabelarnom obliku za jednostrani i dvostrani test.

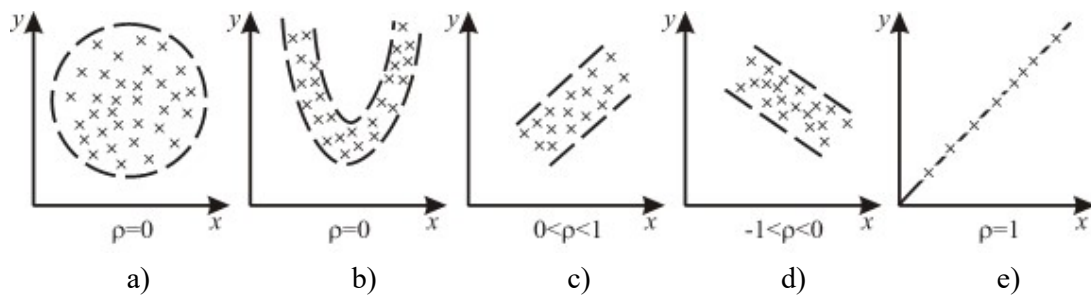
*Poređenje:* Odbacivanje hipoteza se vrši ako je  $u < U_{n_x, n_y; \alpha}$  [66]

U ovom radu je U-test primenjivan na sledeći način: a) eksperimentalno je određivan statistički uzorak od 50 ili 100 (u nekim retkim slučajevima, statistički uzorak je bio i znatno veći) slučajnih veličina karakteristika kanure odnosno uzoraka uzetih sa kanura (pri čemu je parametar eksperimenta bilo vreme provedeno u eksploataciji); b) statistički uzorak od 50 ili 100 slučajnih veličina za datu karakteristiku kanuru ili uzorak uzet sa kanure podeljen na pet statističkih poduzoraka po deset statističkih veličina ili pet poduzoraka sa po dvadeset slučajnih veličina (ako je osnovni broj slučajnih veličina 100). Statistički uzorci u poduzorcima su ređani po veličini (od najmanje do najveće) i označeni sa 1, 2, 3, 4 i 5; c) ista procedura je izvršena i sa eksperimentalnim rezultatima korigovani zakonom porasta verovatnoće; d) nakon toga su uzorci 2, 3, 4 i 5 testirani radi provere da li pripadaju istom statističkom uzorku kao i uzorak 1; e) u slučaju korigovanih uzoraka zakonom porasta verovatnoće svi su testirani na pripadnost istom statističkom uzorku kao i nekorigovani poduzorak 1 (pritom oznaka 1←2 znači da je testiran uzorak 2 u odnosu na uzorak 1, itd.). Samo testiranje je bilo strožije nego što test traži, naime za test je uzimana minimalna vrednost odnosa statistike testa i kritične vrednosti kao granica prihvatanja ili odbacivanja testa. Rezultat je prikazivan kao zavisnost odnosa statistike testa i kritične vrednosti za statističku nesigurnost  $\alpha = 5\%$ .

### 3.5. Korelacije i regresije

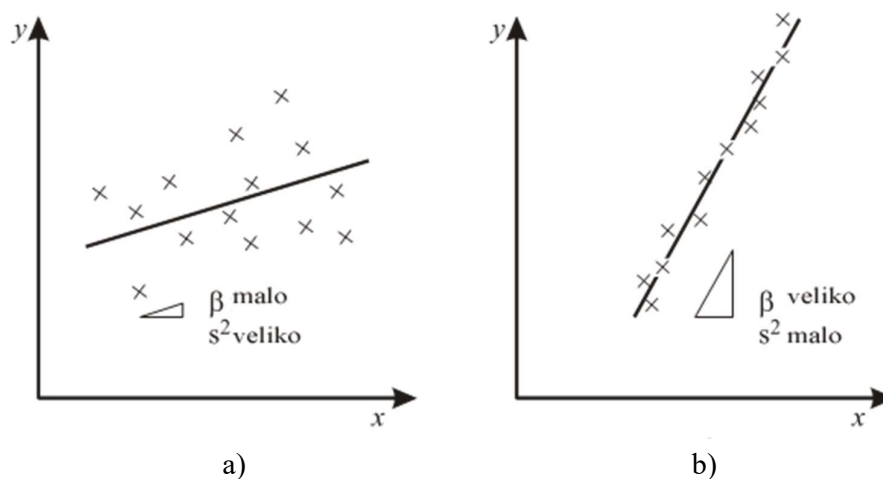
Međupovezanost slučajnih promenljivih koje ne moraju biti jednorodne, a koje se mere u slučajnim eksperimentima na jedinstvenim uzorcima mogu biti međupovezane, delimično međupovezane, ali mogu i da nemaju nikakvu međusobnu vezu. Kakav je odnos između takvih veličina u prethodnom smislu definišu pojmovi korelacija i regresija [66, 70 - 73].

Korelacija utvrđuje da li su slučajne promenljive merene na istom uzorku  $X$  i  $Y$  koje se mere konstantno u konstantnom uzročno-posledičnom odnosu (odnosno da li je njihova međupovezanost linearnog tipa). Kvantitativna mera posmatranog odstupanja posmatranog sistema promenljivih od linearne veze određuje koeficijent korelacije  $\rho$ . Korelacija se može odrediti da to ima smisla samo ako obe slučajne posmatrane promenljive  $X$  i  $Y$  pripadaju normalnoj raspodeli. Koeficijent korelacije po modulu obavezno mora imati vrednosti  $|\rho| \leq 1$ . U slučaju da je vrednost koeficijenta korelacije između posmatranih fizičkih veličina  $X$  i  $Y$  nula one nisu u korelaciji, slike 3.1a) i 3.1b). Ako je  $|\rho|$  bliže jedinici, stepen korelacija između posmatranih fizičkih veličina je jači. Kada je  $\rho > 0$ ,  $X$  i  $Y$  rastu ili opadaju zajedno, to se naziva "pozitivna korelacija", slika 3.1c). Kada je  $\rho < 0$ , velike vrednosti  $Y$  su vezane za male vrednosti  $X$ , onda se to naziva "negativna korelacija", slika 3.1d). Za  $|\rho| = 1$  znače stoprocentnu korelaciju, slika 3.1e).



Slika 3.1 - Mogući položaji veličina  $X$  i  $Y$ : a) veličine koje nisu korelisane; b) veličine koje su linearno nekorelisane; c) korelacija koja je pozitivna; d) korelacija koja je negativna; e) totalna korelacija [66]

Mala razlika između regresije i korelacije je u tome što se ne ispituje veze između dva slučajna uzorka već između jednog slučajnog uzorka i odnosa između slučajnih uzoraka ili slučajnih uzoraka i parametara. Samim tim i ako je suština korelacije i regresije različita one se matematički identično ispituju. U mnogim primenama u tehnici je posebno zanimljiva zavisnost isključivo od jednog posebnog parametra. Pri tome parovi vrednosti  $(x_i; y_i)$  i grafički se prikazuju za regresiju ( $x_i$  bi onda, na primer, bilo parametar, a  $y_i$  realizovana slučajna promenljiva).



Slika 3.2 - Ishod veličina  $X$  i  $Y$ , kao mere njihove zavisnosti: a) zavisnost je slaba; b) zavisnost je jaka.  $\beta$  je koeficijent pravca,  $s^2$  je varijansa. [66]

Na osnovu prethodno iznetog uslova o pripadnosti slučajnih promenljivih u linearnoj regresiji Normalnoj raspodeli, onda su one povezane linearnom funkcijom:

$$EY = \alpha + \beta EX \quad (3.11)$$

U slučaju linearne regresije je izuzetno pogodno i u svakom pogledu praktično koristiti grafičku predstavu. Pri tome se prikazuju prave primenom metoda minimalnog kvadratnog odstupanja (ili neki drugi sistem optimalnog fitovanja) kroz grafički predstavljene parove vrednosti  $(x_i; y_i)$ , slika 3.3. Za pouzdane vrednosti, ocenjene vrednosti  $(a; b)$  treba da se izračunaju za koeficijente  $\alpha$  i  $\beta$  nekog od metoda optimalnog fitovanja.

Za razasute tačke i na regresionoj pravoj, i za malu vrednost koeficijent pravca, linearna zavisnost između veličina  $X$  i  $Y$  je slaba, slika 3.2a. Ukoliko je sa druge strane, veća koncentracija rezultata, a koeficijent pravca veliki, to ukazuje na jaku linearnu zavisnost, slika 3.2b.

Postojanje razlika između zavisne veličine i one koja to nije utvrđuje se regresiona prava  $y$  od  $x$ , tj.:

$$y = a_{yx} + b_{yx}x \quad (3.12)$$

odnosno izraz 3.12 predstavlja optimalno fitovanje empirijski određene vrednosti  $y$ , slika 3.3a. Zbir kvadrata vertikalnih odstupanja (ako se kriterijum minimum razlike kvadrata prihvati kao metod optimalnog fitovanja) treba biti minimalan, dok je u obrnutom slučaju:

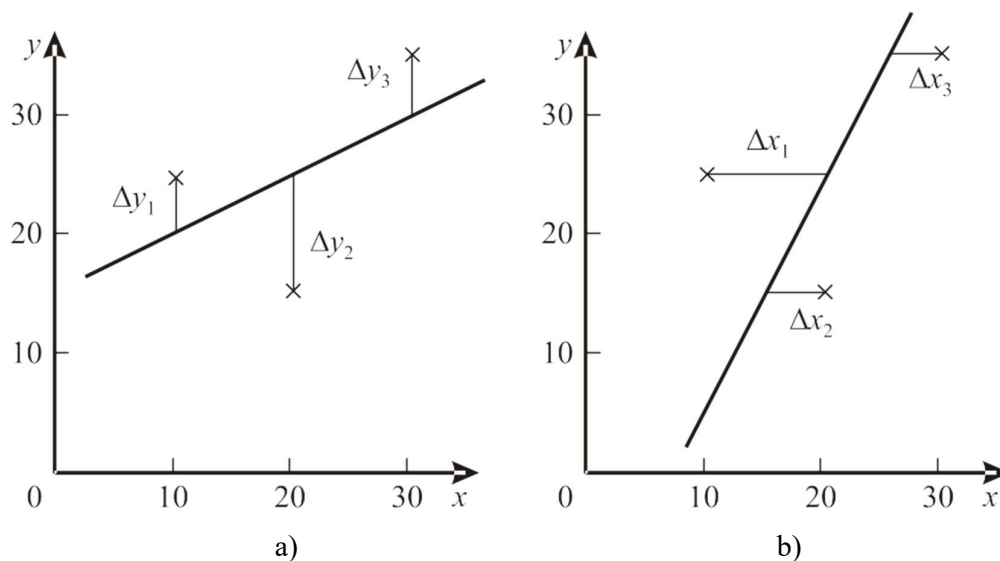
$$x = a_{xy} + b_{xy}y \quad (3.13)$$

Zbir kvadrata odstupanja po horizontali treba biti minimalan, slika 3.3b. Od suštine posmatranog problema zavisi regresija treba da bude izvršena. Sa porastom regresije, smanjuje se razlika između regresionih pravih opisanih jednačinama 3.12 i 3.13, slika 3.4. Za koeficijente korelacije  $|\rho| = 1$ , regresione prave se preklapaju, a za koeficijente pravca se dobija:

$$b_{xy} = \frac{1}{b_{yx}} \quad (3.14)$$

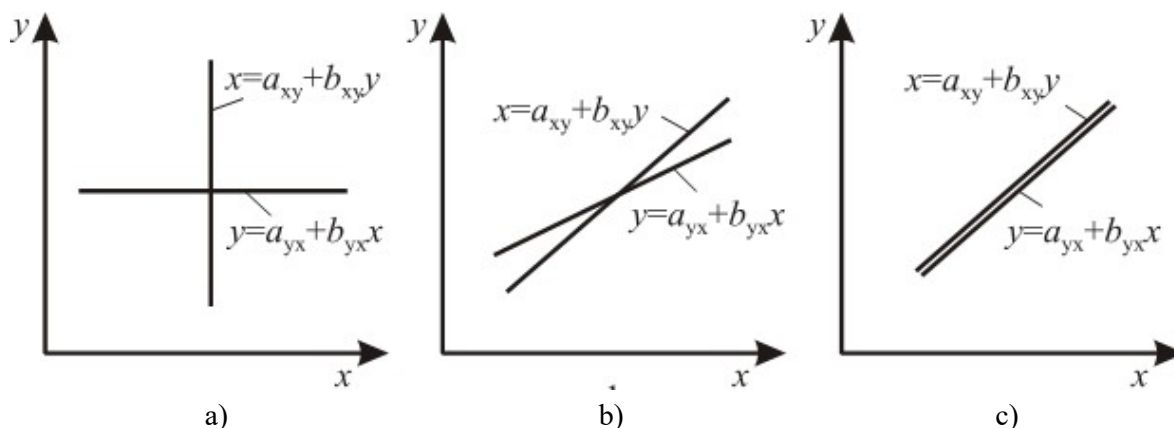
dok je obično ( $|\rho| \leq 1$ ):

$$\rho = \sqrt{b_{yx}b_{xy}} \quad (3.15)$$



Slika 3.3 - Perturbacija zavisnih i nezavisnih veličina u regresiji: a) regresija  $y$  od  $x$  ( $\sum(\Delta y_i)^2 = \min$ ); b) regresija  $x$  od  $y$  ( $\sum(\Delta x_i)^2 = \min$ ) [66]

Na slikama 3.4 dat je prikaz kako se izračunava korelacija u slučaju ispunjenosti uslova linearnosti.



Slika 3.4 - Uvezanost regresionih pravih linija  $x$  i  $y$  i odgovarajućih koeficijenata korelacije  $\rho$ :  
 a)  $\rho = 0$ ; b)  $0 < \rho < 1$ ; c)  $\rho = 1$  [66]

### 3.5.1. Procena koeficijenta korelacije

Da bi se izvršila ocena koeficijenta korelacije potrebno je posmatrati statistički uzorak koji se sastoji od  $n$  uredjenih parova vrednosti  $(x_i; y_i)$  i na osnovu njega odrediti odgovarajuće aritmetičke sredine  $\bar{x}$  i  $\bar{y}$  i odgovarajuća srednja kvadratna odstupanja  $s_x$  i  $s_y$ . Pored toga treba uvesti empirijsku kovarijansu:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.16)$$

koja povezuje posmatrane veličine i predstavlja umnožak srednjih odstupanja, kao što se iz izraza 3.16 vidi.

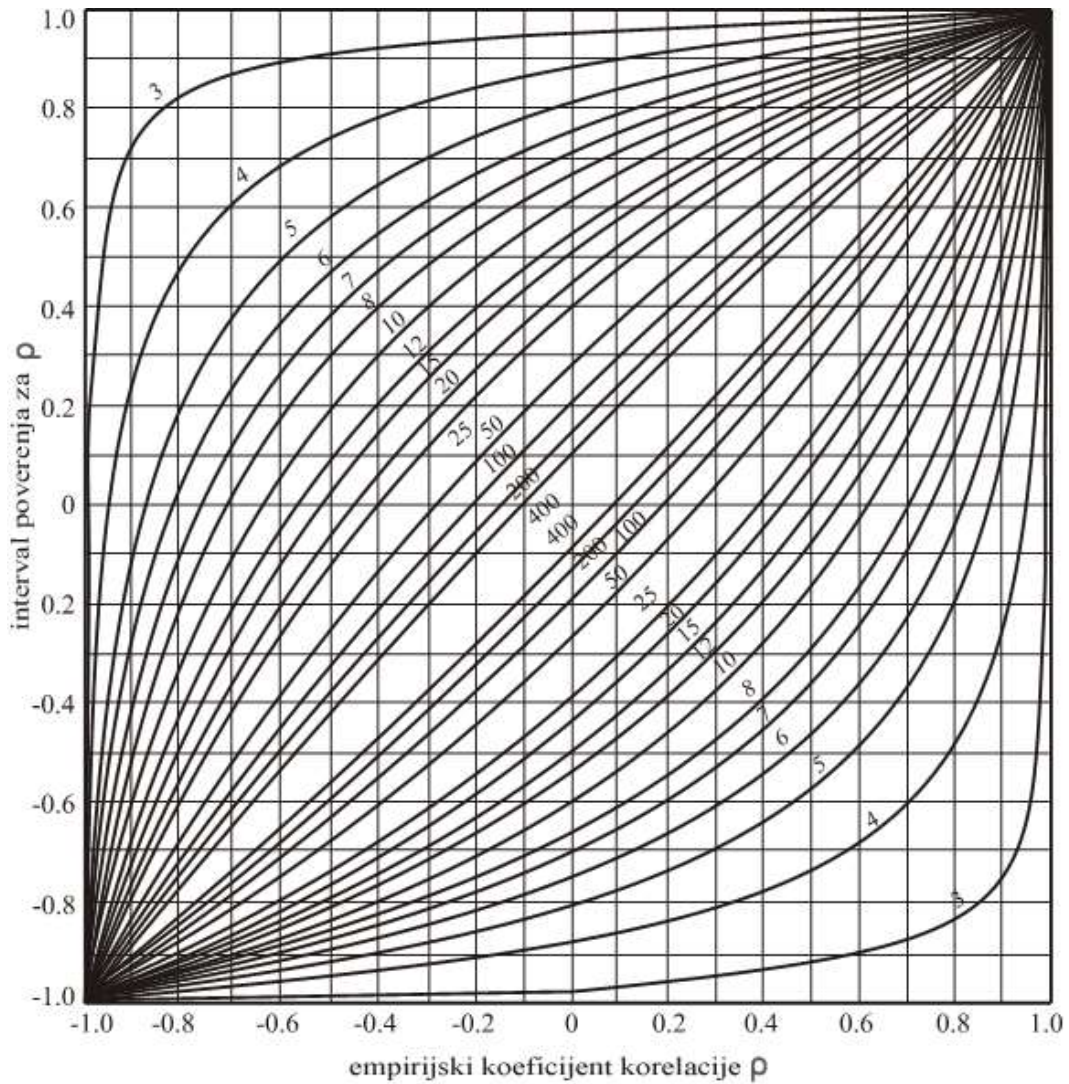
Pomenute veličine omogućavaju da se odredi empirijski koeficijent korelacije:

$$\rho = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (3.17)$$

koji omogućava izračunavanje izraze (što se nekad zove robusni postupak):

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2)}} \quad (3.18)$$

Obostrani interval poverenja preuzima se sa slike 3.5. U slučaju da obostrani interval poverenja ne obuhvata vrednost  $\rho = 0$ , zaključuje se da  $\rho \neq 0$ , tj. korelacija postoji.



Slika 3.5 - Obostrani intervali pouzdanosti za koeficijent korelacije sa poverenja " $\epsilon=0,95$ " u funkciji dimenzije uzorka  $n$  [66]

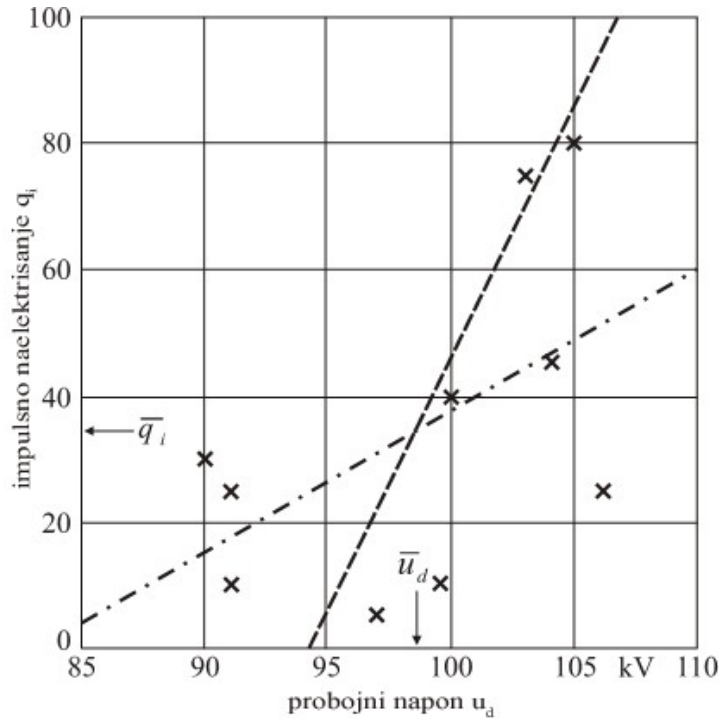
Ako slika 3.5 daje interval poverenja unutar kojeg se nalazi vrednost  $\rho = 0$ , ne može se smatrati da je pouzdano postojanje korelacija između posmatranih veličina. Da bi se potvrdila pretpostavka o tvrdnji da postoji korelacija između posmatranih veličina, potrebno je povećati veličinu uzorka  $n$ .

### 3.5.2. Procena regresionih pravih

Prema uzorku od  $n$  uređenih parova  $(x_i; y_i)$  u regresiji  $y$  od  $x$  (jednačina 3.12), koeficijent pravca se izračunava na osnovu izraza:

$$b_{yx} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \rho \frac{s_y}{s_x} \quad (3.19)$$

$$b_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.20)$$



Slika 3.6 - Grafički prikaz moguće regresione prave: - - - regresija  $y_i$  od  $x_d$ ; - · - · - regresija  $x_d$  od  $y_i$  [66]

Na osnovu prethodnog izraza, za regresiju  $x$  od  $y$  se dobije:

$$b_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_y^2} = \rho \frac{s_x}{s_y} \quad (3.21)$$

$$b_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.22)$$

Slobodni član regresione prave  $a$  može da se odredi na dva analitička načina kao:

$$a_{yx} = \bar{y} - b_{yx} \bar{x} \quad (3.23)$$

$$a_{xy} = \bar{x} - b_{xy} \bar{y} \quad (3.24)$$



$$s_{Ryx}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - a_{yx} - b_{yx}x_i)^2 \quad (3.25)$$

$$s_{Rxy}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (x_i - a_{xy} - b_{xy}y_i)^2 \quad (3.26)$$

Koeficijent pravca i slobodni člana regresione prave definisu varijanse. U slučaju regresije y od x dobije se varijansa slobodnog člana a:

$$s_{ayx}^2 = s_{Ryx}^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{x^2}{(n-1)s_x^2} \right) \quad (3.27)$$

Na isti način je varijansa koeficijenta pravca b:

$$s_{byx}^2 = \frac{s_{Ryx}^2}{(n-1)s_x^2} \quad (3.28)$$

Ovako dobijene dve varijanse stvorile su uslove za izračunavanje dvostranih intervala poverenja y za slobodni član a:

$$\left. \begin{matrix} a_0 \\ a_u \end{matrix} \right\} = a_{yx} \pm t_{n-2; (1+\varepsilon)/2} s_{ayx} \quad (3.29)$$

A takođe i za koeficijent pravca b :

$$\left. \begin{matrix} b_0 \\ b_u \end{matrix} \right\} = b_{yx} \pm t_{n-2; (1+\varepsilon)/2} s_{byx} \quad (3.30)$$

$t_{m;q}$  je kvantil  $F$  raspodele sa  $m = n - 2$  stepeni slobode i reda  $q = (1 + \varepsilon)/2$ .

### 3.6. Zakon porasta verovatnoće električnog pražnjenja u izolacionoj strukturi

Električno pražnjenje u nekoj izolaciji obavezno ima osobinu slučajnosti. Istu osobinu mora imati i dalji razvoj električnog pražnjenja unutar izolacije u kojoj je nastalo. Jednom nastalo električno pražnjenje u izolatoru razvija se kao slučajni proces. Oba ova slučajna procesa (nastanak električnog pražnjenja u izolatoru i razvoj električnog pražnjenja u izolatoru) jedan drugom predhode tretiraju se statističkim funkcijama raspodele. Slučajni procesi koji formiraju statistički uzorak mogu se reprezentovati različitim slučajnim promenljivim (napon, električno polje, vreme trajanja naponskog opterećenja, itd.). Slučajne promenjive koje formiraju statistički uzorak karakterističan za električno pražnjenje, koji se dalje tretira mogu, ali ne moraju, biti deo iste fizičke grupe.

Ispitivanje gotovih proizvoda u konstruktivnoj fazi (ili njihovih sastavnih delova) na realno dimenzionisanim prototipovima je neprihvatljiva sa tehničkog i ekonomskog aspekta. Iz tog razloga se izabira ispitivanje na uzorcima ili umanjenim modelima. Tako dobijeni rezultati (karakteristike uzoraka ili modela se ne mogu direktno preneti na prototip jer sa promenom njihovih dimenzija, u osnovi, dolazi i do varijacije njihovih karakteristika). Sa statističke tačke gledišta posmatranja uvećanja ispitivanih uzoraka ili modela se mogu rešiti primenom zakona porasta verovatnoće koji za osnovu ima zakon množenja nezavisnih verovatnoća [66, 74 - 76]. Da bi se primenio zakon porasta verovatnoće na električna pražnjenja treba imati pouzdan podatak o međusobnoj nezavisnosti pojava koje se dešavaju. To znači da se matematičko-statistička ispitivanja zakonom porasta verovatnoće moraju dopuniti, to jest obuhvatiti odgovarajucim fizičkim istraživanjima [66, 77 - 79].

Sušтина uzroka zakona sličnosti je posledica mikroskopske strukture materije. Molekul kao komponenta mikroskopske strukture je prvi koji ima individualne i izuzetno stabilne karakteristike. Atom ih nema pošto teži formiranju molekula niže ukupne potencijalne energije. Subatomske čestice su elementarne čestice i o njima se ne može govoriti kao o materiji. Materija je dakle molekularne strukture. Međutim, ni u jednom agregatnom stanju molekularna sredina nije u potpunosti homogena. Poreklo nehomogenosti strukture je složeno i uslovljeno pretežno interakcijskim silama (primarnog i sekundarnog tipa). Izuzetak iz ovoga tipa su samo monokristali. Oni nemaju nikakva odstupanja u strukturi i predstavljaju beskrajno ponavljanje istog osnovnog elementa. Međutim, cena njihove proizvodnje je izuzetno velika i kao izolatori se koriste u mikroelektronskim kolima. Svi ostali izolacioni materijali imaju mikrostrukturne varijacije (koje dolaze posebno do izražaja kod izolacije - izolacioni materijal plus elektrode, izolacija čini i visoki vakuum nehomogenim usled ropografskim karakteristika elektroda).

### 3.6.1. Osnovi zakona porasta verovatnoće

Polazna tačka statističkog pristupa porastu ili smanjenju neke izolacione strukture u odnosu na prostor (zapremina  $V$ ) ili u odnosu na vreme ( $T$ ) se zasniva na uvođenju četvorodimenzionalnog povećanja izrazom  $n$ , koji se određuje odnosom između uvećanog ili umanjenog stanja ( $V_n, T_n$ ) i početnog stanja ( $V_1, T_1$ ). Za specijalne slučajeve, što je najčešće slučaj namesto opšteg četvorodimenzijalnog uvećanja obično se koristi trostepeni ili dvostepeni [66, 80 - 83]. Razlog za to je što pri projektovanju ne igraju istu i istovremenu ulogu svi mogući aspekti uvećanja prostorno-vremenskog kontinuuma. Četvorodimenzionalni izraz (faktor) povećanja se piše kao:

$$n = \frac{V_n T_n}{V_1 T_1}, \quad 0 < n < +\infty \quad (3.31)$$

Ovakav četvorodimenzionalni faktor uvećanja ima uglavnom samo teoretsko špekulativnu vrednost pošto bi njegova primena u inženjerskoj praksi vodila izuzetno složenom matematičkom postupku.

Uvećanje, za neki faktor uvećanja  $n$ , izolacionog sistem kod kojeg je pojava verovatnoće električnog pražnjenja sa  $p_1 = F_1(x_0)$ , opterećenja  $x_0$ , menja se i u verovatnoća odgovarajućeg električnog pražnjenja u izraz  $p_n = F_n(x_0)$  kao posledica uvećanja, koji se može prikazati kao posledica zakona množenja nezavisnih verovatnoća. Ako se namesto verovatnoće pojave pražnjenja uzme komplementarna pojava nepražnjenja dobije se relacija prikazana izrazom (3.32). Ovaj postupak se može jasno prikazati ekvivalentnosti verovatnoće proboja jednog paralelno vezanog kondenzatorskog segmenta povećanja (te segmente kojima se aditivno vrši povećanje možemo zamisliti kao kondenzatore površine obloga površine  $S \setminus n$  koji se uvećava do kandenzatora površine obloga  $S$  uz isto rastojanje izmedju obloga). Takvoj ekvivalenciji kondenzatora površine obloge  $S$ , međuelektrodnog rastojanja  $d$  i  $n$  paralelno vezanih kondenzatora površine obloge  $S/n$  (paralelno vezani kondenzatori ne moraju biti iste površine elektroda, ali se tako uzima iz razloga jednostavnosti). Paralelno vezanim kondenzatorima se pridružuju indeksi 1, 2, ...  $n$ .

Izraz (3.32) se može pojasniti činjenicom da ne pojava električnog pražnjenja povećane strukture  $1 - p_n$  podrazumeva ne pojavu električnih pražnjenja svih svih sistema iz kojih se on sastoji  $(1 - p_i)_i$ ;  $i = 1, 2, \dots n$ :

$$(1 - p_n) = (1 - p_1)_1 (1 - p_1)_2 \dots (1 - p_1)_n \quad (3.32)$$

$$p_n = 1 - (1 - p_1)^n \quad (3.33)$$

Gornji izrazi su formirani diskretnim verovatnoćama koje su preglednije, ali izrazi dobijeni na osnovu njih su manje opšti, stoga je zgodno na mesto diskretnih verovatnoća preći na kontinualne to jest na celokupne funkcije raspodele  $F_1(x)$  i  $F_n(x)$  od čega se analogijom dobije:

$$F_n(x) = 1 - (1 - F_1(x))^n \quad (3.34)$$

Ovakvim postupkom se pojava povećanja razmatra preko identično raspodeljenih promenljivih za  $n$  elemenat. I ako ova mogućnost nije uvek slučaj, sistem izolacije statora obrtne električne mašine sa paralelno vezanim identičnim kanurama (a i žičanim namotima) ispunjava potrebne uslove za njegovu primenu. Taj pristup se menja kada se jedna kanura posmatra kao izolacioni sistem. U svakom slučaju jednačina 3.32 prelazi u:

$$(1 - p_n) = (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_i); \quad i = 1 \dots n \quad (3.35)$$

Izraz (3.35) daje osnovu izvodjenja opšteg oblik zakona povećanja za diskretne komponente<sup>2</sup>:

$$p_n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{i}) \quad (3.36)$$

ili:

$$F_n(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{i}(x)) \quad (3.37)$$

Ako su funkcije raspodele  $F_1(x)$  ili  $F_{i1}(x)$  poznate, primena jednačina 3.33 – 3.37 ne predstavlja neki problem za slučaj da su pojedinačne izolacione komponente diskretne. Izraz 3.36 potpuno zadovoljava jednostavne diskretne sisteme. Međutim, u slučaju složenijih i komplikovanih kontinualnih sistema nužno je određene verovatnoće zameniti funkcijama raspodele. Pri tome je nužno izabrati adekvatnu funkciju raspodele. Ako se ne izabere adekvatna funkcija raspodele zakon površina može postati besmislen i dati potpuno pogrešne rezultate. Prilikom izbora adekvatne funkcije raspodele, kao logično rešenje se nameće Vejbulova funkcija raspodele iz razloga što je ograničena sa donje strane vrednošću  $x_0$  i koje se iz nje izvode sve raspodele ekstremne vrednosti, a posmatrani problem jeste problem ekstremne vrednosti pošto na ekstremno slabom mestu izolacije dolazi do električnog proboja (ili parcijalnog pražnjenja ...).

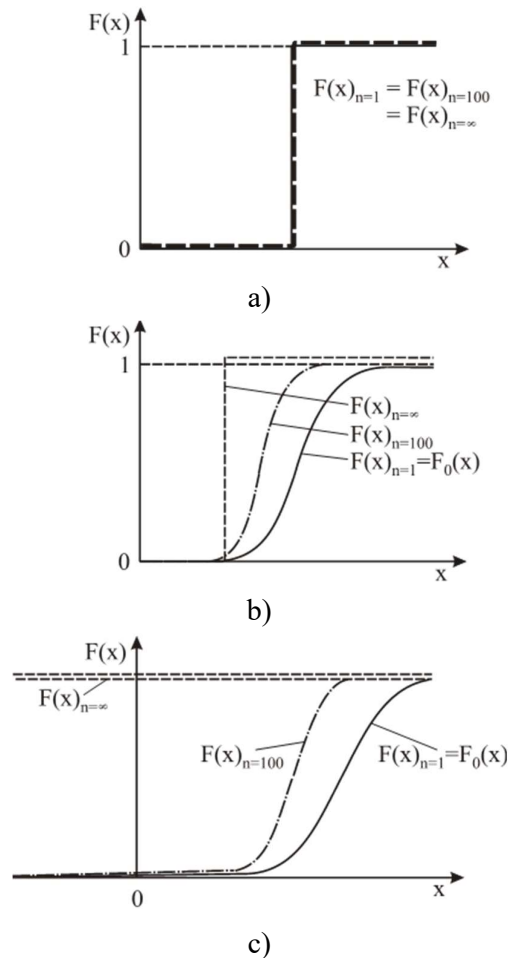
### 3.6.2. Zakon porasta verovatnoće za teorijske funkcije raspodele od interesa

Kao što je rečeno za jednostavnu primenu zakona porasta verovatnoće potrebno je poznavati funkciju raspodele (to jest izabrati adekvatnu) opterećenja u jednačinama 3.33 – 3.37 sada će biti razmatrano šta se dobija primenom pojedinih funkcija raspodele na zakon porasta. Pritom je nužno razmatranja ograničiti na funkcije raspodele koje fizički korespondiraju problematici kojom se bavi ovaj rad (tj. teorijske funkcije od interesa), što će biti i obrazloženo.

Za različite tipove teorijskih raspodela na osnovu opšteg zakona porasta verovatnoće dobijaju se se suštinski različiti, nekada i suprotni, rezultati primenom zakona porasta verovatnoće. To je posledica činjenice da ako procesi koji dovode do električnog proboja (ili drugog oblika električnog pražnjenja) nisu potpuno slučajni (tj. oni su uslovno determinističke prirode) efekat zakona porasta verovatnoće ne važi u svom osnovnom obliku (slika 3.7a), pošto determinizam pojave ne zavisi od prostornih ili vremenskih varijacija posmatrane izolacione strukture. U slučaju da je

<sup>2</sup> gde je  $p_{i1}$  verovatnoća da dođe do električnog proboja  $i$ -tog kondenzatora (ovo važi i za parcijalno pražnjenje pošto pojava bilo koje vrste električnog pražnjenja u jednom od paralelno vezanih kondenzatora odgovara pojavi pražnjenja u celovitom kondenzatoru)

usvojena statisticka raspodele sa donjom granicom (log-normalna raspodela, Weibulova raspodela, itd) nakon primene zakona povećanja verovatnoće i  $n \rightarrow \infty$  konvergira ka raspodeli sa determinističkim opterećenjem ( $x_0$ ), slika 3.7b). Na taj način početna vrednost opterećenja  $x_0$  postaje veoma važna pošto predstavlja graničnu vrednost koja onemogućava bilo kakvu pojavu električnog pražnjenja. Pogrešna procena ove granične vrednosti (previsoka) dovodi da nemogućnosti zaključivanja na osnovu zakona porasta. Funkcije raspodele bez donje granice (na primer normalna raspodela, duploeksponecijalna raspodela) dovode do pojave da funkcija raspodele teži 1 kada  $n$  teži beskonačno, slika 3.7c). U koji praksi retko se pojavljuju faktori povećanja većim od  $10^4$ , što takav granični uslov čini zanemarljivim. Ako se primeni zakon porasta verovatnoće za veliku vrednost faktora povećanja na raspodele koje nisu ograničene dobija se funkcija raspodele u koja je neopravdana u fizičkom smislu. Iz tog razloga se treba fokusirati na raspodele ekstremne vrednosti pošto one imaju matematički model koji korespondira sa zakonom porasta verovatnoće. Ako se zakon primeni na raspodele ekstremne vrednosti, sa identičnim elementima, tip raspodele se zadržava i menja se samo jedan parametar. U slučaju primene zakona porasta verovatnoće na druge raspodele, tip raspodele se menja [84]. Tu treba posebno naglasiti da se kao rešenje nameće troparametarska Weibulova raspodela. Ona je ne samo raspodela koja generiše sve ostale raspodele ekstremnih vrednosti već sa svoja tri parametra je pogodnija za fitovanje eksperimentalnih rezultata sa svojom osobinom da teži 0 u slučaju fizičko-provodnih mali opterećenja.



Slika 3.7 - Rezultati primene zakona uvećanja za razne raspodele: a) raspodele sa tačkastom vrednošću, b) raspodele sa donjom granicom, c) neograničene raspodele, neograničena sa bilo koje strane [66, 76]

Treba naglasiti da pored ovih matematičkih opravdanja za primenu troparametarske Vejbulove raspodele na zakon porasta verovatnoće postoji i fizički razlozi za tu primenu. Pošto do električnog proboja (ili parcijalnog pražnjenja) na nekom izolatoru dolazi na najslabijim mestima izolacije i pošto postoji linearna veza između vrednosti praga parcijalnog pražnjenja i vrednosti probojnog napona pa se može tvrditi da sa verovatnoćom bliskom 1 mesto gde se pojavi parcijalno pražnjenje korespondira mestu gde ce doći i do proboja. Pritom ne postoje mesta (pojave) na izolaciji koja se uravnotežuju sa tim slabim mestima u smislu pojave sprečavanja električnog pražnjenja u njima pa odgovarajuća statistička raspodela statističkih uzoraka dobijena izolacionim ispitivanjima ne može biti simetrična [84 - 86]. To je , kao sto je naglašeno i razlog što raspodele ekstremnih vrednosti imaju treći centralni momenat različit od nule, to jest nisu simetrične.

Matematičko kao i fizičko tumačenje opravdava primenu troparametarske Vejbulove raspodele na klasu problema razmatranih u ovom radu, naročito u slučaju identičnih početnih raspodela. Naravno, to ne znači da se pre primene troparametarske Vejbulove raspodele na eksperimentalno dobijeni statistički uzorak ne treba (obavezno treba) testirati pripadnost slučajnih veličina tog uzorka svim raspodelama ekstremne vrednosti, kao i Normalnoj raspodeli.

Ako se za identične početne raspodele primeni troparametarska Vejbulova raspodela  $F_1(x) = 1 - \exp\left[-\left((x - x_0)/\eta_1\right)^\delta\right]$  na zakon porasta verovatnoće dobija se:

$$F_n(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\eta_1}\right)^\delta n\right] \quad (3.38)$$

gde su  $\eta_1$ ,  $x_0$  i  $\delta$  parametri početne raspodele. Primenom zakona povećanja na Vejbulovu raspodelu za faktor  $n$  dolazi isključivo do promene 63%-nog kvantila. Do te promene dolazi na sledeći matematički način:

$$\eta_n = (x_{nm} - x_0)_{63} = \eta_1 n^{-1/\delta} = (x_{1m} - x_0)_{63} n^{-1/\delta} \quad (3.39)$$

dok početna vrednost  $x_0$  i Vejbulov eksponent  $\delta$  ostaju isti. Iz toga razloga na papiru Vejbulove verovatnoće, funkcije raspodele nastale iz redukovane Vejbulove raspodele ( $\eta_1=1, x_0=0$ ) su paralelne sa odgovarajućom početnom raspodelom.

Pojednostavljena primena zakona porasta verovatnoće za električna pražnjenja u izolacionim strukturama kontinualne prirode postignuto je primenom mešovite aditivne raspodele dobijene iz bliskih raspodela Vejbulovog tipa. Prema ovom rešenju standardno odstupanje  $n$ -puta uvećanog osnovnog sistema dato je izrazom:

$$\sigma_n = n^{-k} \sigma_1 \quad (3.40)$$

gde je  $\sigma_1$  standardno odstupanje osnovnog sistema dok je  $k$  parametar. Odgovarajuća srednja vrednost  $n$ -puta uvećanog osnovnog sistema  $\bar{x}_n$  dato je izrazom:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_1 - L(k)(1 - n^{-k})\sigma_1 \quad (3.41)$$

gde je  $\bar{x}_1$  srednja vrednost osnovnog sistema, dok je:

$$L(k) = [\Gamma(1 + 2k) - \Gamma^2(1 + k)]^{-0.5} \cdot \Gamma(1 + k) \quad (3.42)$$

gde je  $\Gamma(k)$  gama funkcija promenljive  $k$ .

Pojednostavljeni izrazi zakona porasta verovatnoće 3.40 i 3.41 se veoma često koriste u proračunima rezultata dobijenih na malim modelima na očekivane rezultate na gotovim prototipovima. Međutim, isti izrazi se koriste za predviđanje efekata smanjenja nekih izolacionih sistema [86].

Primena zakona porasta u ovom radu je vršena tako što su stohastički određeni standardno odstupanje i srednja vrednost osnovnog sistema ( $\sigma_1, \bar{x}_1$ ) i n puta uvećanog sistema ( $\sigma_n, \bar{x}_n$ , gde je n racionalan broj). Nakon toga je fitovanjem eksperimentalne zavisnosti  $\sigma_n$  izrazom 3.40 određivano k. Za tako dobijeno k i izrazom 3.41 određivana je zavisnost srednje vrednosti n puta uvećanog sistema od faktora uvećanja n i poređenje dobijene kontinualne vrednosti sa eksperimentalno određenim vrednostima  $\bar{x}_n$ . U slučaju dobrog slaganja dobijenih vrednosti na osnovu izraza 3.41 i odgovarajućih eksperimentalnih rezultata izrazi 3.40 i 3.41 su smatrani verifikovanim i primenjivim za posmatrani kontinualni sistem. Primena pojednostavljenog zakona porasta verovatnoće je veoma česta u inženjerskoj praksi prilikom modelovanja izolacionih struktura.

Da bi prethodno izvedeni izrazi mogli koristiti u praksi nužno je proveriti pripadnost svih slučajnih promenljivih (statističkih uzoraka za početni sistem i za uvećane sisteme) na pripadnost troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. To se radi poređenjem eksperimentalno dobijenih koeficijenata varijacije statističkih uzoraka za različite vrednosti faktora uvećanja n sa odgovarajućim teorijskim očekivanim zavisnostima za različite statističke raspodele od interesa. U tabeli 3.2 su date zavisnosti koeficijenata varijacije od faktora porasta za: Vejbulovu dvoparametarsku raspodelu, Vejbulovu troparametarsku raspodelu, Duploeksponecijalnu raspodelu i Normalnu raspodelu.

**Tabela 3.2: Zavisnost koeficijenta varijacije od faktora porasta [66]**

Raspodela	Konverzija od $\left(\frac{s}{x}\right)_1$ do $\left(\frac{s}{x}\right)_n$	Napomena
(1) Vejbulova dvoparametarska raspodela $x_0 = 0$	$\left(\frac{s}{x}\right)_n = \left(\frac{s}{x}\right)_1$	Koeficijent varijacije ne zavisi od faktora uvećanja
(2) Vejbulova troparametarska raspodela	$\left(\frac{s}{x}\right)_n = \left(\frac{s}{x}\right)_1 \frac{1}{1 + \frac{x_0}{x}(\delta\sqrt[n]{n} - 1)}$	Slučaj (1) važi za $x_0 = 0$ $x_0, \delta$ parametri Vejbulove raspodele
(3) Duplo-eksponecijalna raspodela	$\left(\frac{s}{x}\right)_n = \left(\frac{s}{x}\right)_1 \frac{1}{1 - \left(\frac{s}{x}\right)_1 \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln n}$	-
(4) Normalna raspodela	$\left(\frac{s}{x}\right)_n = \left(\frac{s}{x}\right)_1 \frac{k_{1n}}{1 - \left(\frac{s}{x}\right)_1 k_{2n}}$	$k_{1n} = \frac{1}{2}(\lambda\sqrt[n]{0,84} - \lambda\sqrt[n]{0,16})$ $k_{2n} = \frac{1}{2}(\lambda\sqrt[n]{0,84} + \lambda\sqrt[n]{0,16})$ $\lambda\sqrt[n]{0,84}$ и $\lambda\sqrt[n]{0,16}$ su kvantili reda $\sqrt[n]{0,84}$ и $\sqrt[n]{0,16}$ nekog $N(0;1)$

### 3.7. Određivanje krivih životnog veka izolacionog sistema

Osnovna funkcija izolacionog materijala (sistema u opštem slučaju) je da razdvaja različite potencijale i sprečava protok struje između njih (misli se struje u punom iznosu, tj. struje kratkog

spoja). Kada iz nekog razloga izolacioni materijal prestane da vrši tu svoju funkciju i kroz njega počne da teče struja koja je u fazi sa naponom koji se stvara razlikom pomenutih i prethodno razdvajanih potencijala, može se tvrditi da je završen životni vek izolacionog materijala o kome je bila reč. U eksperimentalnoj tehnici je praksa da se za ovakav problem primeni metod dve promenljive, napona i vremena (ili struje i vremena, što je suštinski isto). Opredeljenje za prvu ideju vodi ispitivanju konstantnim naponom. Pošto bi ispitivanje na jednom uzorku konstantnim naponom bilo neekonomično sa vremenske tačke gledanja, u praksi se vrši ispitivanje na više uzoraka. Pri tome se posebno mora obratiti pažnja da napon na svim uzorcima bude isti i da ispitivani uzorci budu identični. Na taj način ispitivanje konstantnim (nepromenljivim u vremenu) naponom  $U_{d1}$  na eksperimentalnom uzorku od  $n$  identičnih ispitnih uzoraka kao rezultat daje  $n$  ishoda slučajne promenljive probojno vreme uz konstantnu vrednost probojnog napona.

Empirijska raspodela slučajne promenljive probojno vreme (slika 3.8a) dobija se na osnovu višestruko obnovljenog eksperimentalnog postupka. Očekivati je da se dobije eksperimentalna raspodela koja se ponaša najpribližnije Vejbulovoj raspodeli pošto će do proboja stalnim naponom sigurno doći na ekstremno slabom mestu izolacionog uzorka (kao što je rečeno Vejbulova raspodela fituje slučajne promenljive dobijene eksperimentom konstantnim naponom):

$$F(t_d; u_{d1}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t_d}{t_{d63}(u_{d1})} \right)^{\delta_t} \right] \quad (3.43)$$

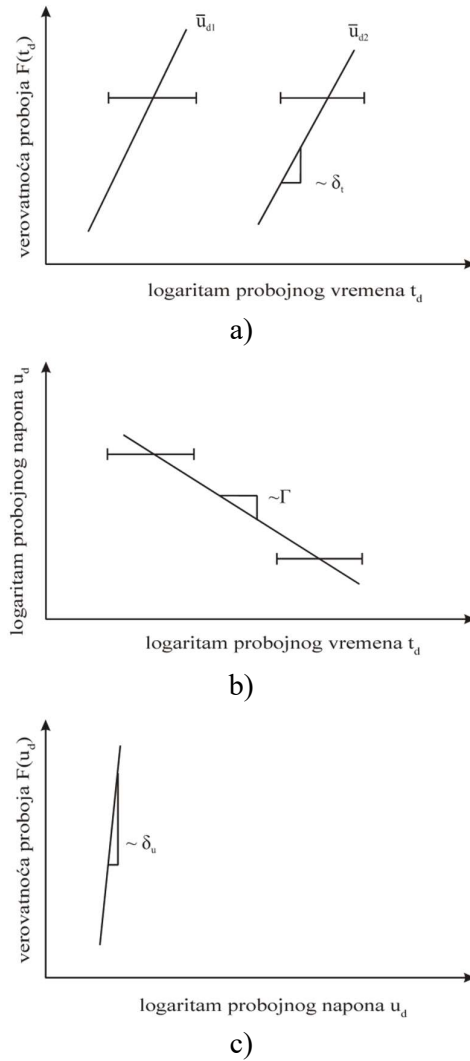
Dobijena statistička raspodela, data prethodnim izrazom proisteklim iz pretpostavke primenljivosti Vejbulove raspodele na posmatrani fenomen naziva se i karakteristika životnog veka. Pošto se karakteristika životnog veka dobija kao zavisnost konstantnog probojnog napona od vremena, ona se konstruiše pomoću odabranih kvantila navedene raspodele. Pokazano je da na taj način dobijeni diagram obrazuje pravu na duploeksponecijalnoj skali, slike 3.8b) i 3.9. Ako su su za date kvantile verovatnoće za koji je izabran poznati intervali poverenja dobijen odgovarajućim t-testom, oni se mogu preneti na karakteristike životnog veka. Za svaki red kvantila  $p$  probojnog vremena, karakteristika životnog veka opisana je:

$$u_{dp} = k_{dp} t_{dp}^{-1/r} \quad (3.44)$$

gde je  $k_{dp}$  konstanta određena geometrijom strukture, dok je  $r$  eksponent životnog veka koji zavisi isključivo od izolacionog materijala. Odstupanje od oblika prave za vek trajanja ukazuje da dolazi do promene mehanizma starenja izolacionog materijala [66].

U slučaju da se opredeli za drugi navedeni tip eksperimenta, tj. za posmatranje slučajne promenljive probojni napon pri konstantnoj vrednosti probojnog vremena (odnosno ispitivanju konstantnim vremenom) dobije se analogna funkcija raspodele funkciji raspodele date izrazom 3.43 (što je logično iz razloga simetrije postupka). Na taj način se dobijaju dve moguće Vejbulove raspodele koje karakteriše da za slučaj promenljivog probojnog vremena  $t_{d1}$  uz fiksiranje probojnog napona  $U_d$  i za slučaj promenljivog probojnog napona  $U_d$  uz fiksiranje probojnog vremena  $t_{d1}$  mora imati istu verovatnoću  $F(t_d; u_{d1}) = F(u_d; t_{d1})$ :

$$F(u_d; t_{d1}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{u_d}{u_{d63}(t_{d1})} \right)^{\delta_u} \right] \quad (3.45)$$



Slika 3.8 - Postupak konstrukcije funkcija izvodnice probojnog vremena: a) karakteristike životnog veka; b) funkcije izvodnice probojnog napona; c) šematski prikaz [66]

$$u_{d63}(t_{d1})[t_{d1}]^{\delta_t/\delta_u} = u_{d1}[t_{d63}(u_{d1})]^{\delta_t/\delta_u} \quad (3.46 a)$$

Izraz 3.44 koji se naziva zakonom životnog veka, koji je konstantan u uslovu nepromenljivosti mehanizma starenja i pod pretpostavkom da je eksponent  $r$  identičan za sve kvantile izvodi se da za istu zavisnost i za vrednost  $(u_{d1} = u_{d3}; t_{d1})$  bude:

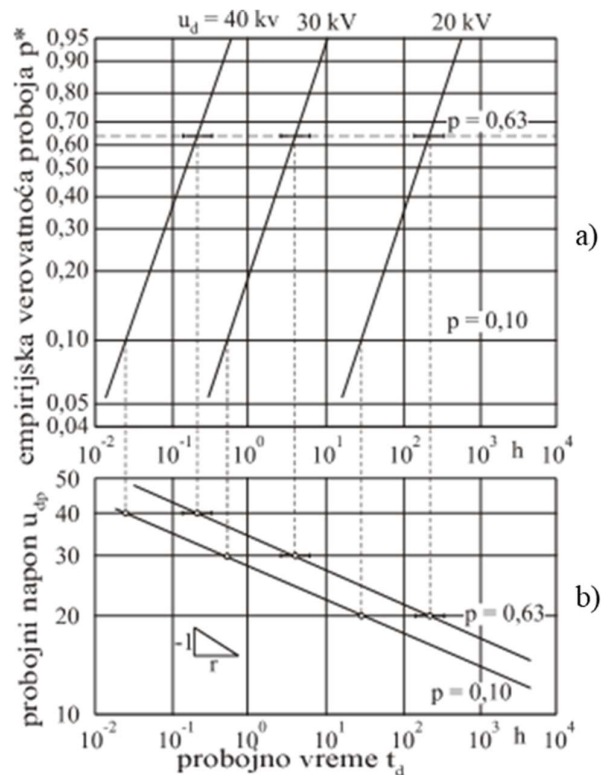
$$u_{d63}(t_{d1})[t_{d1}]^{1/r} = k_{d63} \quad (3.46 b)$$

Izjednačavanjem 3.46a i 3.46b, dobija se veza između Weibulovih eksponenata za probojno vreme  $\delta_t$ , probojni napon  $\delta_u$  i eksponenta životnog veka  $r$ :

$$r = \frac{\delta_u}{\delta_t} \quad (3.47)$$



Važno je napomenuti da je relacija 3.47 tačna samo ako oba parametra (probojni napon i probojno vreme) pripadaju Weibulovoj raspodeli, što je već u nekoliko navrata istaknuto, teorijski pokazano i eksperimentalno potvrđeno. Naravno, ova relacija (3.47) i iz nje matematički izveden oblik, mogu da se koriste samo ukoliko  $r$  podjednako važi za sve kvantile.



Slika 3.9 - Konstrukcija karakteristike životnog veka na osnovu rezultata eksperimenta konstantnim naponom: a) izvodnice probojnog vremena (Weibulov papir); b) karakteristika

$$\text{životnog veka } u_d = k_d t_d^{-1/r} \quad [66]$$

Karakteristika životnog veka, slika 3.9 omogućava da se na osnovu nje utvrdi životni vek obrtne električne mašine uz određeni kvantil verovatnoće koji mu se pridružuje. Sa slike 3.9 se vidi da će, u uslovima besprekorne izrade statora i rotora, kriva životnog veka predstavljati pravu koja opada ka vrednosti nula probojnog napona LCCL izolacije (u skladu sa karakteristikama životnog veka i jedinstvenog mehanizma starenja izolacije). U svakoj tački karakteristike životnog veka postoji statistički faktor poverenja vremena i napona (na slici 3.9 su nacrtani faktori poverenja vremena u tačkama u kojima je vršeno merenje). Kada kriva životnog veka dostigne vremensku osu dolazi do električnog pražnjenja (parcijalnog pražnjenja i električnog proboja usled faktora poverenja vremenskog i naponskog). To, ne naročito intenzivno električno pražnjenje dovodi do cepanja i onako znatno oštećene i oslabljene LCCL izolacije između provodnika kanure. Usled kidanja ove LCCL izolacije dolazi do raslojavanja provodnika kanure dejstvom elektrodinamičkih sila koje se javljaju usled postupka izrade kanure, kao i usled dejstva oscilatornog naprežanja, slika 1.6. U prostor između raslojenih provodnika kanure prodire vazduh (a možda i vlaga, zavisno od ambijentalnih uslova u kojima se obrtna električna mašina nalazi). Gasovi koji se nađu u prostoru između raslojenih provodnika se šire usled povećane temperature koja tu vlada izazvana Džulovim efektom u provodnicima. Širenje gasova u prostoru između provodnika svojim pritiskom doprinosi daljem raslojavanju između provodnika i usled toga se javljaju ispupčenja u strukturi kanure koja dalje rastu. Sva razmatranja odnose se na kanure koje su uzete sa obrtnih električnih mašina koje su nakon

uključivanja imale normalan (bez havarija) radni vek. Pošto je pretpostavka o istovetnosti svih kanura statora i uslova njihovog rada, može se smatrati da se ovakav proces javlja približno istovremeno na mnogim kanurama statora. Pojava takvih raslojenih kanura nakon kratkog vremena premosti relativno mali prostor između statora i rotora. Mehanički kontakt koji se tom prilikom ostvari unosi precesionu komponentu u obrtanje rotora sa pozitivnom povratnom spregom što nužno za posledicu ima mehaničko oštećenje statora i rotora čime obrtna električna mašina završava svoj životni vek. Pri tome treba imati u vidu da je vrednost dužine životnog veka (ili ostatka životnog veka) statistička veličina i da njenu vrednost treba prihvatiti sa kvatnilom verovatnoće pridružene karakteristici životnog veka (na slici 3.9 to je 10 % ili 63 %). Naravno do ovog raslojavanja i cepanja LCCL izolacije kod starijih kanura što se vidi ako se uporede kanure prikazane na slikama 5.38a) i 5.38c).

#### 4. EKSPERIMENT I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Procena preostalog životnog veka izolacionog sistema obrtne električne mašine u uslovima kombinovanog naprezanja utvrđivanjem karakteristika životnog veka je zahtevan zadatak koji, pored metoda statističke matematike, podrazumeva veliki broj eksperimenata izvedenih pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima sa tehnički prihvatljivom mernom nesigurnosti. Međutim, eksperiment na izolacionom sistemu realnih električnih mašina, veće snage, koji bi generisali potrebne statističke uzorke relevantnih slučajnih promenljivih je teško izvodljivo. Naime, ispitivanje celokupnog stanja izolacije statora obrtne mašine podrazumevalo bi isključivanje mašine iz pogona (uz eventualnu zamenu rezervnom), odnošenja mašine u remontni pogon, vađenje rotora i ispitivanje svake kanure pojedinačno. Takav postupak, čijoj temeljitosti se ne može ništa zameriti, je ekonomski i vremenski neprihvatljiv. Zamena kompletne obrtne mašine nakon određenog vremena u pogonu (procenjenog iskustveno, odnosno na osnovu uputstva proizvođača) ili na osnovu redovnog merenja temperature i drugih inspekcijских nadzora je nepouzđano, pošto po pravilu, takav postupak dovodi do prevremene zamene i gubitka dela životnog veka. Iz tog razloga je od prvenstvenog značaja razviti i verifikovati algoritam koji bez velikih zahvata na obrtnoj mašini i bez njenog dugotrajnog isključenja iz pogona može da pruži, relativno pouzđanu procenu ostatka životnog veka izolacije statora.

Životni vek, odnosno ostatak životnog veka, svih složenih sistema (tehničkih i bioloških) određen je vekom trajanja njegovim komponentama najpodložnijih starenju, a bez kojih je njegovo funkcionisanje nemoguće. U slučaju obrtnih mašina, teoretski, i na osnovu iskustva remontnih radionica, kao najpodložnija komponenta procesu starenja, tj. komponenta čije starenje dovodi do preko 50 % ispadanja iz rada je izolacija statora.

Eksperimenti vršeni u ovom radu su bili koncipirani da se postigne postavljeni cilj, tj. da se formira ekonomičan, jednostavan, brz i pouzđan postupak kojim se može izvršiti predikcija ostatka životnog veka obrtne električne mašine u zavisnosti od kombinovanog naprezanja mašine u uslovima eksploatacije. Da bi se ostavrio ovaj cilj potrebno je odrediti odgovarajuću komponentu izolacionog sistema statora električne mašine i njenu izolacionu karakteristiku čija je promena u vremenu zadovoljavajući indikator njenog životnog veka (a preko nje i celog izolacionog sistema statora). Kako je prethodno naglašeno da je za pouzđano statističko zaključivanje poželjan što veći statistički uzorak i da je preporučljivo da ispitivana izolaciona karakteristika bude reverzibilna u odnosu na merni metod kojim se određuje. Rešenje za ovako postavljen problem je: komponenta izolacionog sistema statora električne mašine koju treba odabrati je kanura (ili deo kanure), a izolaciona karakteristika koju treba meriti je vrednost praga parcijalnog pražnjenja ili tangens ugla gubitaka. Razlog za ovakav izbor je jednostavan. Naime, stator električne mašine se sastoji od identičnih kanura koje su bile tokom rada izložene identičnim naprezanjima, a vrednost praga parcijalnog pražnjenja i tangens ugla gubitaka su reverzibilne karakteristike izolacije određene njenom degradacijom u vremenu [87].

Eksperimentalni postupak je vršen na statorskoj izolaciji obrtne mašine, pojedinačnim kanurama uzetih iz statora obrtne mašine i na uzorcima izolacije uzetim sa kanura. Na raspolaganju su bili uzorci, u velikom broju, i istog tipa uzeti sa istih obrtnih mašina koje su u pogonu (pod približno jednakim uslovima) provele 5, 10, 15 i 20 godina<sup>3</sup>. Pored korišćenih kanura na raspolaganju za eksperiment su bile dostupne i nove kanure. Eksperimentalno su određivani: tangens ugla gubitaka, otpor izolacije 1 minut od puštanja mašine u rad i 10 minuta od puštanja u rad (na osnovu rezultata tih merenja izračunavan je indeks polarizacije), vrednost praga parcijalnog pražnjenja, vrednost probojnog napona (merenje vrednosti probojnog napona vršeno je samo na manjem broju uzoraka

---

<sup>3</sup> Podaci o starosti statora i o vremenu provedenog u pogonu dobijeni su od profesora Lasla Vereba koji je statore i kanure obezbedio i vodio preciznu evidenciju o njima u dužem vremenskom periodu. U tačnost dobijenih podataka nema razloga da se sumnja pogotovo što su potvrđeni objavljivanjem u više vodećih međunarodnih časopisa. Ove podatke potvrđuju i rezultati prikazani u ovom radu.

pošto to merenje spada u destruktivna merenja, na osnovu vrednosti praga parcijalnog pražnjenja i vrednosti probojnog napona određivan je koeficijent proporcionalnosti), određivane su karakteristike životnog veka (na osnovu određenih karakteristika životnog veka izračunavan je eksponent životnog veka). Parametri merenja su bili temperatura, mehaničko naprezanje (oscilatorno), dejstvo prenapona (simulirano pomoću standardnog atmosferskog oblika impulsa 1.2/50  $\mu$ s), vlažnost. Merenja su vršena na isti način na novim uzorcima i korišćenim uzorcima.

Mogućnost ispitivanja jedne kanure na određene dielektrične karakteristike i na osnovu toga zaključivanje o stanju statorske izolacije je značajno pojednostavljeno eksperimentalnog postupka. To pojednostavljenje, ipak, nije dovoljno da omogući brzo i efikasno određivanje karakteristika životnog veka statorske izolacije pošto je ono povezano sa dugotrajnim ispitivanjem najmanje 50 uzoraka konstantnim naponom. Iz tog razloga se u ovom radu vršilo ispitivanje da li je moguće na mesto cele kanure vršiti ispitivanje neki određeni njen deo čije izolacione osobine određuju izolacione osobine cele kanure (sa zadovoljavajućom verovatnoćom), a time i celog statora obrtne mašine.

Nalaženjem zadovoljavajuće korelacije između izolacionih karakteristika takvog uzorka uzetog sa kanure i izolacije statora obrtne mašine bi znatno olakšalo postizanje postavljenog cilja. Naravno, da bi bilo moguće doći do rezultata i na takvom uzorku postići u prihvatljivom vremenu potrebno je ispitivanje konstantnim naponom zameniti ispitivanjem rastućim naponom uz svođenje dobijenih rezultata na rezultate koji bi bili dobijeni konstantnim naponom. Na taj način bi bio postignut cilj koji bi omogućio brzo i pozdano određivanje ostatka životnog veka statora obrtne mašine. Zahvaljujući tom algoritmu je moguće odrediti uticaje vrsta naprezanja na ostatak životnog veka obrtne mašine. U ovom radu će biti, pored određivanja ostatka životnog veka obrtne mašine, u zavisnosti od naprezanja, odrediti i ista zavisnost za ostale relevantne izolacione karakteristike što će biti lako pošto će sva ispitivanja biti vršena na uzorcima uzetim sa kanure.

#### 4.1. Korišćena eksperimentalna oprema

Tokom eksperimenta su korišćeni sledeći instrumenti:

1. Za merenje praga parcijalnog pražnjenja korišćen je instrument B2HV opremljen softverom za merenje parcijalnog pražnjenja pri frekvenciji 0.1 Hz i snabdeven softverom za primenu na obrtnim mašinama, slika 4.1. Merenje je vršeno pri frekvenciji 0.1 Hz iz sledećih razloga: 1- merni sistem je praktičniji za mobilne dijagnostike; 2- na frekvenciji 0.1 Hz parcijalna pražnjenja se mere jednostavnije i 3- merenja sa frekvencijom 0.1 Hz sprečava da na uređaju koji se testira dođe do bilo kakvih reverzibilnih ili ireverzibilnih promena tokom testiranja (što je i najvažnije). Postupak merenja parcijalnih pražnjenja (pa tim i vrednosti napona praga parcijalnih pražnjenja vršeno je u skladu sa standardom IEC 60270). Merna nesigurnost prema podatku proizvođača je za merenje parcijalnog pražnjenja 1.2 %. Za merenje dielektričnih gubitaka, ponekad, je korišćen i uređaj CDAX 605. Instrument je skoro neograničenog opsega, automatskog procesa merenja i merenje je moguće na kapacitivnim, induktivnim i otpornim uzorcima, merna nesigurnost 0.29 %. Tangens ugla gubitaka je meren takođe primenom B2HV instrumentom pri frekvenciji *ac* napona od 0.1 Hz. Pošto je instrument B2HV u osnovi namenjen merenju tangensa ugla gubitaka bilo je potrebno izvršiti dopunu softvera za ova merenja (što proizvođač nudi u dopunskom paketu zajedno sa dopunom softvera za merenje tangensa ugla gubitaka u trafoima). Merna nesigurnost prema podatku proizvođača je za merenje tangensa ugla gubitaka 1.7 %.

2. Instrument za merenje otpora je bio firme METRISO PRO 57-1-487, promenljivog opsega sa mogućim naponima merenja po izboru 100 V, 200 V, 500 V, 1000 V i 10 000 V, dok je merna nesigurnost 1 %.

3. Generator jednosmerne struje je bio 30/300 proizvođača GARDENmaster koji je pouzdan relativno stari instrument merne nesigurnosti 2.7 %.

4. Jednosmerni ampermetar firme Fluke 117 široke mogućnosti prilagođenja merenoj veličini, merna nesigurnost 1.4 %.



Slika 4.1 - Instrument za merenje praga parcijalnog pražnjenja B2HV Diagnostics

5. Jednosmerni voltmetar firme CHAUVIN ARNOUX 11 45460 širokog opsega, prilagođen svim standardima, merna nesigurnost 0.62 %.

6. Infracrveni termometar FR880 JIACOM, merna nesigurnost 0.2 %.

7. Uređaj za visokonaponsko ispitivanje je bio firme PowerOak PS8, merna nesigurnost 1.5 %.

8. Merenje vibracija je vršeno na instrumentu firme Schwingungsmessgeräte Vibration Meters.

Vršeni su sledeći eksperimentalni postupci:

- Dielektrični gubici su mereni pri nominalnom naponu električne mašine iz koje su uzeti, prema standardu JUS A5.015.
- Merenje otpora izolacije vršeno je jednosmernim naponom od 1000 V. Vrednosti otpora izolacije  $R_1$  i  $R_{10}$  su očitavani na instrumentu nakon jednog i nakon deset minuta posle priključenja napona na kanuru. Pozitivna veza instrumenta bila je povezana na provodnik kanure, a negativna veza na gvozdenu uzemljenu armaturu (utor). Indeks polarizacije  $S$  je računat prema obrascu  $S = R_{10}/R_1$ .
- Merenje otpora izolacije vršeno je prema JUS A5.011.
- Prag parcijalnog pražnjenja je meren priključenjem na visokonaponski naizmjenični uređaj (koji je napajan preko regulacionog trafoa). Provodnik kanure je vezan za visoki napon, a gvozdena uzemljena armatura (utor) na nulti vod. Ovakvo povezivanje je bilo isto i za određivanje praga parcijalnog pražnjenja i za određivanje probojnog napona. Povećanje napona do pojave praga parcijalnog pražnjenja je vršeno po JUS N.A5.012.

Tokom merenja praga parcijalnih pražnjenja, tangensa ugla gubitaka i probojnog napona merni instrumenti su se nalazili u mernoj kabini zaštite 100 dB od električne komponente elektromagnetnog polja i 40 dB od magnetne komponente elektromagnetnog polja, slika 4.2.



Slika 4.2 - Merna kabina

Merni signali su do zaštitne kabine dolazili negalvanskim vezama (optički kablovi). Zaštitna kabina je bila snabdevena električnom energijom preko razdvojnog trafoa. Tokom merenja je, povremeno, proveravano prisustvo elektromagnetnog polja u mernoj kabini instrumentom NARDA SRM 3006 (slika 4.3) i rezultat je uvek bio negativan, tj. u mernu kabinu nije prodiralo spoljašnje elektromagnetno polje (u granicama mernog instrumenta) [74].



Slika 4.3 - Instrument za merenje nejonizujućeg elektromagnetnog zračenja NARDA SRM 3006

#### 4.1.1. Postupak opterećenja (podešavanje parametara postupka opterećenja)

Termičko opterećenje je vršeno po modifikovanom standardu IEEE 117-1974 koji sadrži temperature izlaganja u pojedinim ciklusima, a bazira se na približnom postupku „10 stepeni“ za izolaciju, što znači da se životni vek izolacije prepolovljava za svakih 10 stepeni porasta temperature izolacionog sistema.

Izbor temperature izlaganja zavisi od klase primenjivanih izolacionih materijala (u ovom radu se može smatrati da izolacioni sistem pripada klasi F (155 °C)). Odabrane ispitne temperature su bile proizvoljne, u okviru dozvoljenog, da obuhvate što veći dijapazon mogućih slučajeva.

U postupku temperaturskog naprezanja se uzorci za proveru na određenoj temperaturi stavljaju u predgrejanu peć tako da su podjednako izloženi temperaturi u peći i cirkulaciji toplog vazduha.

Po isteku trajanja jednog ciklusa, topli uzorci su vođeni, direktno na sobnu temperaturu. Na taj način svi uzorci će biti izloženi i to dva puta tokom jednog ciklusa (ciklusi za klasu F traju 1, 2, 4, 8, 16 ili 32 dana). Kao što je rečeno, u ovom radu su korišćene nestandardne temperature koje se mogu javiti kod obrtnih mašina sa spoljnim primenama.

Peć koja se upotrebljava je imala mehaničku ventilaciju da bi se tražena ventilacija ostvarila u svim delovima peći.

Mehaničko naprezanje je vršeno na kanurama na sobnoj temperaturi i bile izlagane mehaničkom naprezanju, tačnije vibracijama, u trajanju od jednog sata. Kanure ili uzorci (kanure su bile stegnute u veštačke stezaljke) pričvrste se na vibracioni sto koji je obezbeđivao: a) vibracije uspravno na površinu ploča za namote; b) frekvenciju vibracije od 50 Hz; c) amplitudu vibracije od 0.2 m i d) vreme trajanja vibracije na 1 sat.

Za naprezanje vlagom se preporučuju dve metode: 1) držanje kanure u atmosferi 100 % vlažnosti ili potapanje u vodu. Ne može se tvrditi koja je od ove dve metode strožija. U ovom radu je korišćena vlažna komora kojom je kanura mogla biti držana na željenoj vlazi pri željenoj temperaturi (skoro uvek 30 °C). Trajanje izlaganja vlazi je iznosilo 48 sati. Kvalitet vode je bio određen da mu provodnost ne sme biti veća od 20  $\Omega\text{m}^{-1}$ .

#### 4.2. Izbor nedestruktivne metode za određivanje karakteristika životnog veka obrtne mašine (prag parcijalnog pražnjenja ili tangens ugla gubitaka)

Parcijalno pražnjenje i tangens ugla gubitaka jesu nesumnjivi pokazatelji degradacije izolacionih svojstava izolacionog materijala, ali između njih postoji fizička razlika kada se posmatraju sa aspekta namotaja statora visokonaponske obrtne mašine. Kraj životnog veka izolacije statora obrtne mašine je kada dođe do električnih proboja kanure koje se nalaze u njoj. Vrednost električnog napona pri kojoj dolazi do proboja je linearno povezana sa odgovarajućim vrednostima praga parcijalnog napona. Ta veza je određena koeficijentom proporcionalnosti  $k$ . U tom smislu električni proboj se desi ili se ne desi. Ako je do proboja došlo životni vek izolacije je okončan i ostatak životnog veka je nula. Taj kraj životnog veka prefabrikovanog namotaja je, na taj način, i naponsko i vremenski određen. Slučajna promenljiva tangens ugla gubitaka je drugačije prirode. Gubici stalno rastu time što je sve veći deo struje u fazi sa naponom čime zagrevaju izolator i pospešuju njegovo starenje. Ali to se nikada ne dešava u jednom trenutku i ne završava nekim drastičnim fenomenom kao što je prelaz iz neprovodnog u provodno stanje.

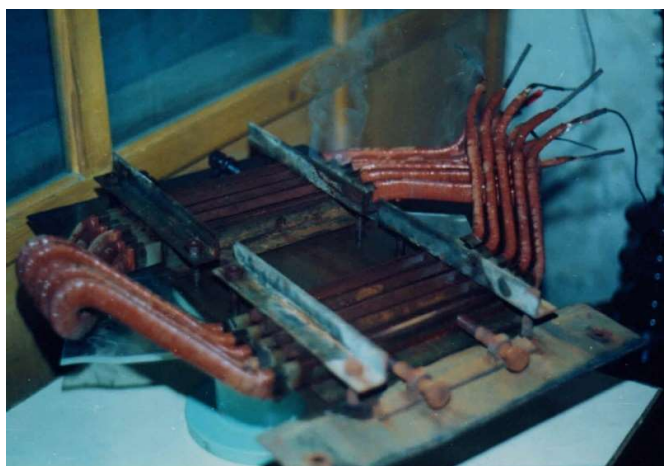
Tangens ugla gubitaka je kontinualne prirode, a pored toga je i frekventno zavistan što onemogućuje da se definiše neka njegova vrednost koja označava kraj života izolacionih mogućnosti nekog materijala. Iz tog razloga je za određivanje dužine veka trajanja primenljivo jedino merenje praga parcijalnog pražnjenja. Dodatni argument za ovakav izbor je linearna veza između praga parcijalnog napona i vrednosti probojnog napona. U ovom radu će biti, ipak, proveravano da li postoji korelacija slučajnih promenljivih probojni napon i tangens ugla gubitaka.

### 4.3. Ispitivani uzorci

U skladu sa prethodno iznetim, procena preostalog životnog veka izolacionog sistema asinhronne obrtne električne mašine u uslovima kombinovanog napreznja utvrđivanjem karakteristike veka trajanja ispitivana je odgovarajućim merenjima na kanurama i na njihovim delovima. Postupak i organizacija merenja koncipirana je tako da se, primenom metoda statističke matematike mogu dobiti statistički uzorci relevantnih slučajnih veličina podobnih za dalju statističku obradu i statističko zaključivanje u skladu sa postavljenim ciljem rada.

#### 4.3.1. Ispitivanje na kanurama

Od kanura koje su provele isto vreme u pogonu vršeno je ispitivanje 1, 2, 3, 4 i 5 kanura uz paralelno ispitivanje celog statora od 50 kanura. Kanure koje su vađene iz statora postavljene su u stege stegnutih istom silom kao i u žljebovima statora. Temperatura izdvojenih kanura podešavana je da bude jednaka temperaturi kanura u statoru obrtne mašine. Na slici 4.4 prikazane su izdvojene kanure u stegi koje su u pogonu provele 10 godina.



Slika 4.4 - Stega sa kanurama koje su provele 5 godina u pogonu

Eksperimentalni postupak se sastojao iz sledećih sukcesivnih koraka: 1- merenje 100 uzastopnih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja na kontrolnom setu kanura i na celom statoru uz pauzu od jedne minute između dva uzastopna merenja; 2- merenje 100 uzastopnih vrednosti tangensa ugla gubitaka na kontrolnom setu kanura i na celom statoru uz pauzu od jedne minute između dva uzastopna merenja; 3- ponavljanje postupka koraka 1 i 2 uz izdvajanja jedne kanure iz kontrolnog seta kanura (tj. broj kanura iz kontrolnog seta je smanjen sa 5 na 4); 4- ponavljanje postupka koraka 1 i 2 uz izdvajanje još jedne kanure iz kontrolnog seta kanura (tj. broj kanura iz kontrolnog seta je smanjen sa 4 na 3); 5- ponavljanje postupka koraka 1 i 2 uz izdvajanje još jedne kanure iz kontrolnog seta kanura (tj. broj kanura iz kontrolnog seta je smanjen sa 3 na 2); 6- ponavljanje postupka koraka 1 i 2 uz izdvajanje još jedne kanure iz kontrolnog seta kanura.

Tokom merenja praga parcijalnog pražnjenja na kontrolnom setu od samo jedne kanure vršeno je paralelno i optičko posmatranje lokacije pojave parcijalnog pražnjenja u kanuri. Ovo posmatranje je vršeno termovizijskom kamerom HikVision, slika 4.5 u zamračenoj prostoriji i ono je omogućavalo da se odredi da li električno dijagnostikovano parcijalno pražnjenje nastaje u zoni I ili zoni II ili zoni III kanure (slika 1.8).





Slika 4.5 – Termovizijska kamera HikVision

Po završenim merenjima formirano je pet statističkih uzoraka od 100 slučajne promenljive prag parcijalnog pražnjenja izmerenih na kontrolnom setu od 5, 4, 3, 2 i 1 kanure, zatim pet statističkih uzoraka od 100 realizacija slučajnih promenljivih izmerenih na celom statoru, kao i jedan statistički uzorak od 100 realizacija slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka izmerenih na kontrolnom setu od 5, 4, 3, 2 i 1 kanure i jedan statistički uzorak statističkih uzoraka od 100 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka izmerenih na celom statoru.

#### 4.3.2. Ispitivanje na uzorcima uzetim sa kanure asinhronne obrtne električne mašine

Ispitivanja izolacionih karakteristika delova kanure, u zavisnosti od oblasti kanure iz koga su uzeti uzorci, relativno često su bile predmet naučnih i stručnih rasprava [18, 19, 23, 24, 55, 56]. Te rasprave su se, pretežno, odnosile na mogućnost trajne homogenizacije izolacije kanure i/ili njenog pojačanja na mestima na kojima je oslabljena tehnološkim postupkom fabrikacije i koja trpe veća naprezanja tokom eksploatacije asinhronne obrtne električne mašine. Cilj takvog pristupa je dvojak i svojim ostvarenjem bi bio postignut nesumnjiv ekonomski efekat. Naime, korekcijom izolacionog sistema kanure, posebno u delovima koji se ne nalaze u žljebovima statora obrtne mašine, bilo bi moguće, u nekim slučajevima za visokonaponske obrtne mašine, povećati nominalni napon i time izbeći potrebu za transformisanje napona sa mrežnog na nominalni, a takođe, bez obzira na napajanje, homogenizacija i delimično pojačanje izolacije kanure bi sa sigurnošću produžio životni vek obrtne mašine. Pri takvim razmatranjima, što je potpuno opravdano, podrazumevalo se da postoje 3 oblasti kanure u kojima dolazi, iz prethodno navedenih uzroka, do različitih izolacionih karakteristika kanure i to su oblasti označene kao zona I, zona II i zona III, na slici 1.8.

Za razliku od takvog pristupa i cilja naučna i stručna diskusija u ovom radu je usmerena ka formiranju algoritma koji bi omogućio da se na brz i ekonomičan način bez dužeg isključenja obrtne mašine iz pogona odredi ostatak njenog životnog veka sa pridruženim kvantilom verovatnoće (bez ikakvih ambicija na izmene izolacije kanure ili tehnološkog postupka njene fabrikacije). Nakon validacije takav algoritam bi omogućio da se ispita uticaj različitih tipova naprezanja i njihove sinergije odnosno da se zavisno od uslova eksploatacije odredi nakon kog utroška životnog veka obrtnu mašinu treba zameniti u pogonu i eventualno remontovati.

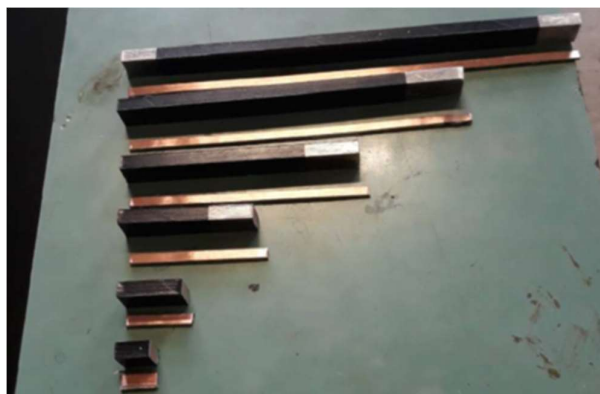
Za ostvarenje ovako postavljenog cilja potrebno je odrediti zavisnost probojni napon - probojno vreme izolacije statora sa verovatnoćom gubljenja njenih izolacionih svojstava, tj. nastupanjem proboja, kao parametrom. Naravno, snimanje probojni napon - probojno vreme karakteristike sa verovatnoćom kao parametrom svakako ne bi bilo ostvarenje ideje „da se na brz i

jeftin način bez dužeg isključenja obrtne mašine iz pogona odredi ostatak njenog veka trajanja sa pridruženim kvantilom verovatnoće“. Naprotiv, to bi bilo u potpunosti suprotan postupak. Međutim, statističkim postupcima prikazanim u prethodnim paragrafima ovog poglavlja biće ispitano da li postoji izražena korelacija između slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja pojedinačnih kanura uzetih sa statora obrtne mašine i iste slučajne promenljive celog statora (sa nadomeštenim izdvojenim kanurama približno istih karakteristika). Takođe, biće ispitano, istim metodama, da li postoji korelacija između slučajne promenljive tangens ugla gubitaka pojedinačnih kanura uzetih sa statora obrtne mašine i iste slučajne promenljive celog statora (sa nadomeštenim izdvojenim kanurama približno istih karakteristika). Ispitaće se i da li je koeficijent korelacije između slučajnih promenljivih prag parcijalnih pražnjenja i tangens ugla gubitaka omogućava da se deo ispitivanja vrši merenjem tangensa ugla gubitaka.

U prethodno navedenim radovima reprezentativnost izolacionog sistema kanure za izolacioni sistem statora obrtne mašine iz koje je ta kanura uzeta se podrazumevala (a to podrazumevanje je objašnjeno nekim, u potpunosti logičnim argumentima) [18]. Na predloženi način će biti ispitano da li postoji mogućnost da se ispitivanjem pojedinačnih kanura odredi prošlost i budućnost izolacionog sistema statora, to jeste utrošak životnog veka i ostatak životnog veka (što su komplementarne veličine). To je svakako znatno pojednostavljenje za dijagnostiku stanja izolacije statora obrtne mašine, ali ipak ne predstavlja „brz i jeftin način“. Naime, snimanje naponsko-vremenskog dijagrama sa verovatnoćom proboja kao parametra je destruktivno ispitivanje i potrebno je minimalno izvršiti električni proboj 50 kanura (što nije mali broj). Da bi se postigao „brz i lak“ način dijagnosticiranja izolacionih karakteristika kanura uzetih sa statora obrtne mašine potrebno je proveriti da li postoje reprezentativni delovi kanure čije bi izolacione karakteristike imale zadovoljavajuću korelaciju sa izolacionim karakteristikama cele kanure (a time i sa izolacionim sistemom statora obrtne mašine). Na osnovu rezultata prikazanih [23] moglo bi se zaključiti da bi uzorak kanure uzet iz dela označenog sa zona I, slika 1.8, trebalo da stoji u jakoj korelaciji sa kompletnom kanurom u pogledu slučajnih promenljivih prag parcijalnog napona i  $ac$  probojni napon (ovo drugo se zaključuje na osnovu navedene linearne zavisnosti između ovih slučajnih promenljivih  $U_{BDV} = kU_{TPD}$ ). Ali to je ipak samo pretpostavka koju treba proveriti i kvantifikovati. Da bi se to uradilo iz kanure su izdvojeni uzorci iz zone I, zone II i zone III. Izdvojeni uzorci su bili višeslojni, tj. svi slojevi kanure, i jednoslojni, tj. dva dela izolatora međusobno i provodnom trakom između, slika 4.6 [24].



a)



b)

Slika 4.6 - Višeslojni i jednoslojni uzorci uzeti sa kanure koje su provele 5 godina u pogonu: a) višeslojni i jednoslojni uzorci uzeti iz zona I, II i III; b) višeslojni i jednoslojni uzorci raznih dimenzija uzeti iz zone III kanure

Uzorci sa slike 4.6a) izrađeni su u raznim dimenzijama, koliko su to dimenzije zona iz kojih su izdvajani dozvoljavali, slika 4.6b). To je urađeno da bi se ispitalo da li veličina uzorka utiče na vrednost koeficijenta korelacije između slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja odnosno probojni napon uzorka i kanure zavisi od dimenzije uzorka. Takođe su ispitivani i složeni uzorci koji su pravljani spajanjem dva uzorka iz zone I ili četiri uzorka iz zone II iz jedne kanure (i za debeloslojne i za tankoslojne uzorke). Takvi složeni uzorci su davali bolju korelaciju između slučajnih promenljivih napon praga parcijalnih pražnjenja cele kanure i uzoraka, ali njihova izrada je bila komplikovana, pa su se ređe koristili.

Postupak merenja slučajnih promenljivih prag parcijalnih pražnjenja i probojni napon vršen na uzorcima izdvojenim iz kanura bio je analogan sa postupkom merenja na pojedinačnim kanurama. Izmene su se sastojale u sledećem: statistički uzorci merenih slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja i probojni napon su se sastojale od 50 slučajnih promenljivih redosled eksperimentalnog postupka je izmenjen (iz istog razloga), instrumentacija za merenje parcijalnog pražnjenja je modifikovana da je mogla da meri i vrednost  $ac$  probojnog napona (sa istom vrednošću frekvencije i neizmenjenom mernom nesigurnošću). Dakle, eksperimentalni postupak se sastojao iz sledećih sukcesivnih koraka: 1- merenje 50 uzastopnih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja na jednoj kanuri uz pauzu od jedne minute između dva uzastopna merenja; 2- merenje 50 uzastopnih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja na jednom uzorku osnovne dimenzije uzetog iz zone I odgovarajuće kanure uz jedan minut pauze između dva uzastopna merenja; 3- ponavljanje koraka 2 za uzorak osnovnih dimenzija uzetog iz zone II odgovarajuće kanure; 4- ponavljanje koraka 2 za uzorak osnovnih dimenzija uzet iz zone III odgovarajuće kanure; 5- merenje slučajne promenljive probojni napon na 50 kanura uz optičko utvrđivanje zone kanure (prema podeli kanure na zone, slika 1.8) u kojoj je proboj nastupio; 6- merenje slučajne promenljive probojni napon na 50 uzoraka osnovnih dimenzija iz zone I; 7- ponavljanje koraka 6 na 50 uzoraka osnovnih dimenzija iz zone II kanure; 8- ponavljanje koraka 6 na 50 uzoraka osnovnih dimenzija iz zone III kanure. Prilikom merenja slučajne promenljive probojni napon nije posebno mereno vreme iz razloga što uvek se radilo o drugom uzorku pošto je probijeni uzorak trebalo promeniti jer se radi o ireverzibilnoj izolaciji.

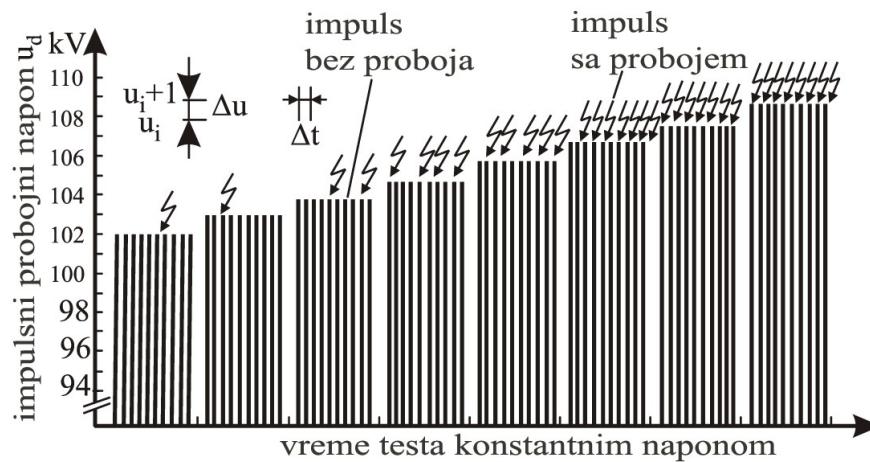
Po završetku merenja formirano je po 6 statističkih uzoraka slučajnih promenljivih prag parcijalnih pražnjenja određivanih eksperimentalno na prethodno opisani način za uzorke uzete iz zona I, II i III kanure različitih dimenzija koje su se odnosile 1 i 6 odgovarajućih statističkih uzoraka slučajne promenljive probojni napon. Takođe su formirani i statistički uzorci 50 slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja i 50 slučajnih promenljivih probojni napon, pri čemu su slučajne promenljive ovih uzoraka dobijene prethodno opisanim eksperimentalnim postupkom.

Tako formirani statistički uzorci testirani su na sledeći način:

a) primenom modifikovanog Šoveneovog kriterijuma iz svakog uzorka su odstranjene nepouzdanosti, tj. sumnjive vrednosti odgovarajuće slučajne promenljive; b) testiranje slučajnih promenljivih svih dobijenih statističkih uzoraka grafičkim testom,  $\chi^2$ -testom i Kolmogorov testom na pripadnost Normalnoj raspodeli, dvoparametarskoj i troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli i duplo-eksponencijalnoj raspodeli; c) za raspodele za koje je utvrđeno da im testirane veličine slučajnih promenljivih pripadaju sa najmanjom vrednošću statističke nepouzdanosti određivani su parametri metodom maksimalne verodostojnosti; d) za sve statističke uzorke za koje su određeni parametri određen je i koeficijent varijacije; e) za sve statističke uzorke od po 50 slučajnih promenljivih izvršena je podela na po 5 statističkih, hronoloških poduzoraka na koje je primenjen U-test statističke pouzdanosti 5 % da bi se utvrdilo da li sve slučajne promenljive jednog statističkog uzorka pripadaju jedinstvenom statističkom uzorku; f) za sve parove statističkih uzoraka, (tj. za statističke uzorke slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja dobijene merenjem na uzorcima i merenjem na kanuri i za statističke uzorke slučajnih promenljivih  $ac$  probojni napon dobijene merenjem na uzorcima i merenjem na kanurama) određeni su koeficijenti korelacije i regresione prave primenom robusnog kriterijuma.

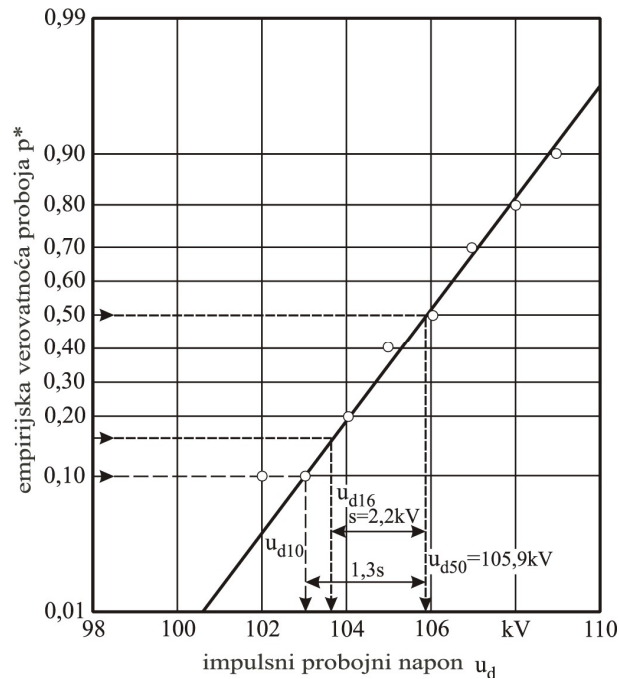
#### 4.4. Određivanja životnog veka rastućim naponom

Određivanja funkcija raspodela kojima se opisuju izolacione karakteristike trebaju biti takve da pruže objektivnu informaciju o sistemima koji se koriste u praktičnim uslovima. To bi značilo da se tokom eksperimenta kojim se određuje statistički uzorak željene slučajne promenljive opterećenja i uslovi trebaju prilagoditi realnim uslovima. Ovo se posebno odnosi na opterećenja kojima se ispituju izolacione osobine. Naime, opterećenja moraju biti definisana u relevantnim aspektima što znači da je celokupna slučajna priroda dobijena ispitivanjem poreklom iz ispitivane izolacije (što je već rečeno). Ponovljena ispitivanja se rešavaju binomnom raspodelom koja omogućava da su na osnovu ponavljanja jednog događaja date veličine ona dogodi u sledećem koraku. Obično se isti postupak ponavlja za neki viši napon što omogućava stvaranje korelacije relativnih učestanosti posmatranog slučajnog događaja, slika 4.7.



Slika 4.7 - Ispitni postupak konstantnim naponom [66]

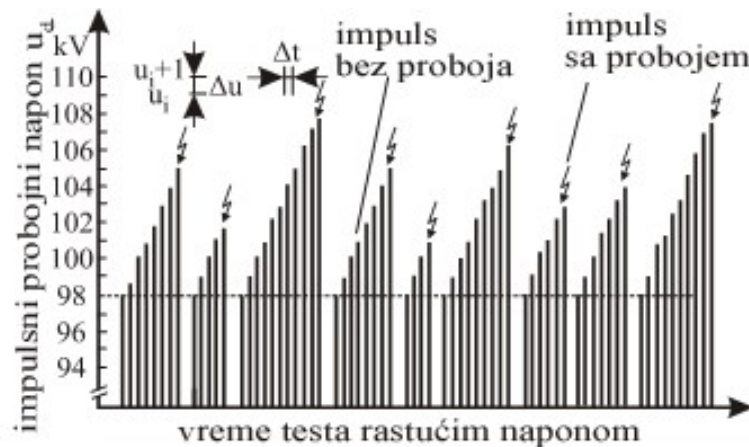
Takvo ispitivanje se naziva „ispitivanje konstantnim naponom“. Rezultat primene ovog postupka ispitivanja naziva se „funkcija izvodnica“ [89]. Na slici 4.8 je prikazana funkcija izvodnica za jedan zamišljeni eksperiment ispitivanja slučajne promenljive probojni napon metodom konstantnog napona.



Slika 4.8 - Funkcije izvodnice prikazane na papiru verovatnoće prirodne raspodele [66]

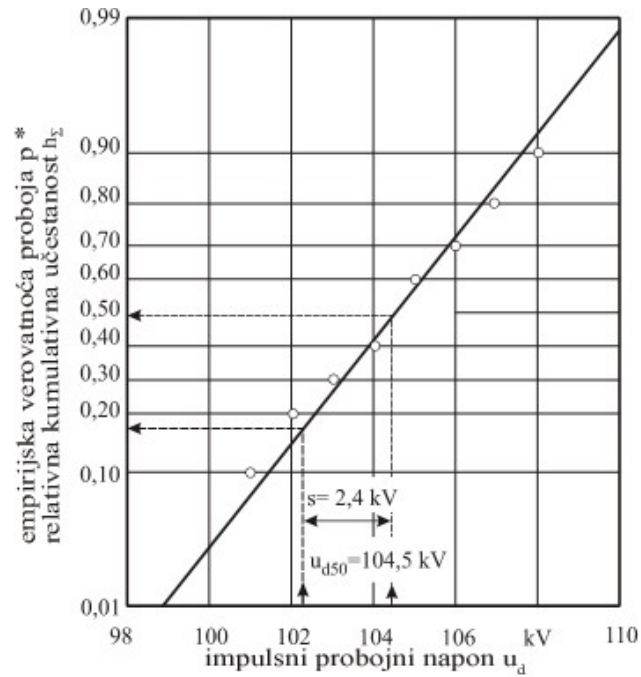
Funkcije izvodnice se, što se vidi sa slike 4.8, prikazuju na papirima verovatnoće pri čemu treba imati na umu da može postojati i znatna razlika između funkcije izvodnice i kumulativne funkcije raspodele, ali i da mogu biti vrlo slične.

Rezultati ispitivanja konstantnim naponom su svakako superiorni u odnosu na ostale metode. Međutim, često je ispitivanje konstantnim naponom tehnički ili ekonomski teško ostvarljivo. Rešenje je u ispitivanju rastućim naponom, slika 4.9.



Slika 4.9 - Ispitni postupak rastućim naponom uz primenu određenog početnog napona ( $u_0$ ) [66]

Na slici 4.10 prikazana je funkcija kumulativne učestanosti na papiru normalne verovatnoće jednog zamišljenog eksperimenta.



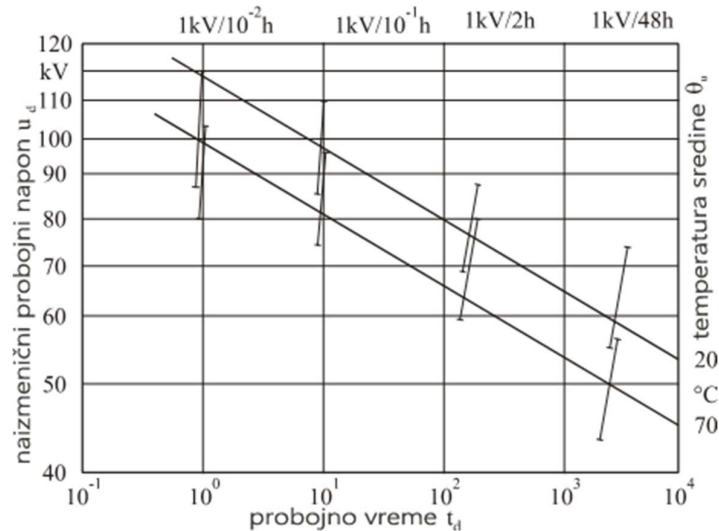
Slika 4.10 – Kumulativne funkcije raspodela i verovatnoće prirodne raspodele [66]

Tokom ispitivanja rastućim naponom proboj je siguran događaj. Ali treba biti svestan da pri ispitivanju rastućim naponom ispitivani napon utiče na funkciju kumulativne učestanosti. U poređenju sa ispitivanjem konstantnim naponom ispitivanje rastućim naponom je brže i ekonomičnije, ali dobijeni rezultati zavise od parametara eksperimenta i ne mogu se direktno upotrebiti u praktičnoj primeni karakterizacije izolacije, tj. formiranja funkcija izvodnica. Funkcije izvodnica dobijene konstantnim naponom i rastućim naponom imaju različita svojstva pa se ne mogu direktno zameniti jedna drugom.

Opređenje za metod merenja je određen ciljem eksperimenta i raspoloživim vremenom. Kao što je rečeno ispitivanje konstantnim naponom daje pouzdane podatke ali iziskuje puno vremena da je praktično neupotrebijiva u ovde razmatranom slučaju. Ispitivanje rastućim naponom je znatno racionalnije vremenski i ekonomski, ali je dobijeni rezultat delimično problematičan (pošto ispitni napon utiče na statistiku eksperimenta). Iz tog razloga se u praksi primenjuje kombinovana metoda kojom se ispitivanje vrši rastućim naponom, a rezultati se teorijsko-numeričkim postupkom svode na rezultate koji bi se dobili eksperimentom konstantnim naponom. Poslednja rečenica je kauzalna i metod koji se njome predlaže traži malu rezervu u pogledu njome dobijenih rezultata.

#### 4.5. Svodenje rezultata dobijenih metodom rastućeg napona na odgovarajuće rezultate koji bi bili dobijeni metodom konstantnog napona

Ispitivanje rastućim naponom kao rezultat daje karakterističnu funkciju kumulativne učestanosti probojnog napona za korišćenu stopu rasta napona  $U_n$ . Da bi se rezultati ispitivanja rastućim naponom iskoristili za dobijanje karakteristika veka trajanja korišćenjem vrednosti  $U_n$  i  $U_d(t_d)$  dijagrama uz korišćenje bitnih kvantila verovatnoće (ili njihovih intervala poverenja) na dobijenim pravolinijskim graficima, slika 4.11.



Slika 4.11 - Određivanje karakteristika životnog veka postupkom rastućeg napona uz prikaz efekta temperature

Prave dobijene fitovanjem (minimumom kvadratne razlike ili nekom drugom metodom) ovih tačaka mogu da se tumače kao karakteristike životnog veka dobijene ispitivanjem rastućim naponom. Tako dobijene karakteristike životnog veka se određuju lakše i brže nego karakteristike veka trajanja dobijene ispitivanjem konstantnim naponom, međutim pružaju manje podataka. To dovodi do potrebe algoritma za svođenje rezultata dobijenih ispitivanjem rastućim naponom i na rezultate ispitivanja konstantnim naponom.

Ovo svođenje se vrši primenom modela akumulacije oštećenja. Ovaj model u osnovi polazi od razvoja ireverzibilne destrukcije strukture čvrstog tela i uvođenjem odgovarajuće veličine relativni utrošak životnog veka:

$$l_v = \frac{t_b}{t_d} \quad (4.1)$$

$t_d$  je probojno vreme, a  $t_b \leq t_d$  vreme opterećenja izolacije. Koristeći karakteristiku životnog veka:

$$u_{dp} = k_{dp} t_{dp}^{(-1)/r} \quad (4.2)$$

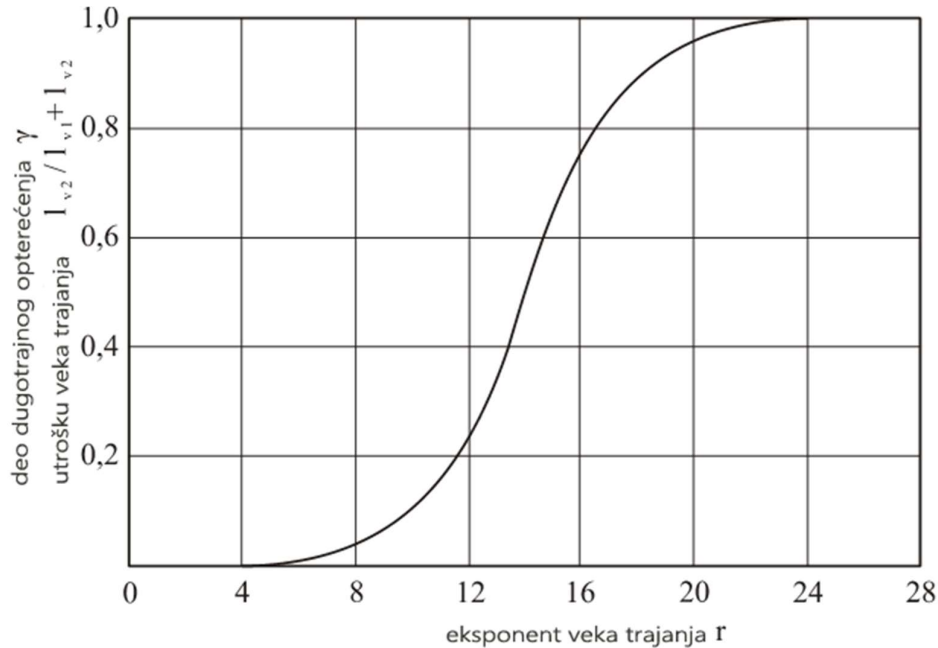
za kvantil od interesa dobija se:

$$t_b = k_{dp}^r l_v (u_b)^{-r} \quad (4.3)$$

prema izrazu 4.3 za određene vrednosti eksponenta životnog veka  $r$ , uređen par opterećenja ( $U_b, t_b$ ) može da se preračuna u ekvivalentni uređeni par opterećenja ( $U_b^*, t_b^*$ ) dobijen sa istim utroškom životnog veka:

$$t_b^* = t_b \left( \frac{u_b}{u_b^*} \right)^r \quad (4.4)$$

Ovo znači da intenzivno opterećenje kratkog trajanja može izazvati isto oštećenje (a tim i isti utrošak životnog veka) kao manje intenzivno opterećenje dužeg trajanja. Sam način izvođenja ove konverzije zavisi prvenstveno od  $r$ . Na primer, čvrsta izolacija opterećena periodom od 25 godina naponom  $U_b$  i tokom 100 sati naponom  $u_b \sqrt{3}$  (zemljospoj) tada utrošak veka trajanja biva (za  $r < 8$ ) determinisan dugoročnim opterećenjem sa  $U_b$ , a za  $r > 20$  opterećenjem, slika 4.12.



Slika 4.12 - Karakteristika životnog veka dobijena rastućim naponom uz prikaz uticaja temperature [71]

Do proboja izolacije dolazi kada relativni utrošak životnog veka bude jednak 1.

Ako se model utroška životnog veka primeni na celo ispitivanje rastućim naponom ( $U_{ds}$ ,  $t_{ds}$ ),

tada je probojno vreme i probojni napon prema jednačini  $t_b^* = t_b \left( \frac{u_b}{u_b^*} \right)^r$  za odgovarajuće ispitivanje

konstantnim naponom ( $U_{dk}$ ,  $t_{dk}$ ), tj. ako je  $U_{dk} = U_{ds}$  za vrednost od nule tada je za sve kvantile verovatnoće:

$$t_{dk} = \frac{t_{ds}}{r+1} \quad (4.5)$$

odnosno:

$$u_{dk} = \frac{u_{ds}}{\sqrt[r]{r+1}} \quad (4.6)$$

U slučaju porasta napona kada počinje od vrednosti veće od nula onda se treba obezbediti da je utrošak životnog veka za period pre porasta napona zanemarljiv, tj. da se početni napon treba odrediti kao:

$$u_0 = u_{ds}^* \sqrt[r+1]{l_{v0}} \quad (4.7)$$

gde je bio utrošak životnog veka za isti porast napona u opsegu  $0 < n < n_0$ .

Prikazan način svođenja rezultata dobijenih ispitivanjem rastućim naponom na rezultate ispitivanja konstantnim naponom podrazumeva konstantnost eksponenta životnog veka za svaki kvantil verovatnoće. Ako se na krivoj veka trajanja javljaju nepravilnosti ili prekidi jednačine:

$$t_{dk} = \frac{t_{ds}}{r+1} \quad (4.8)$$

i:



$$u_{dk} = \frac{u_{ds}}{\sqrt{r+1}} \quad (4.9)$$

ne mogu se upotrebiti. Međutim, ako su navedeni uslovi ispunjeni rezultati svođenja su tehnički primenjivi sa saglasnošću koja je maksimalna u oblasti srednjih vrednosti.

#### 4.6. Postupak određivanja karakteristika životnog veka

Postupak za određivanje karakteristika životnog veka je ovde detaljno opisan što nije bio sličaj sa ostalim eksperimentalnim postupcima u radu. Razlog za to je što su ostala merenja standardnog, odnosno elementarnog tipa i nije postojala potreba da se detaljno opisuju.

U dosadašnjim teoretskim, eksperimentalnim i statističkim razmatranjima došlo se do algoritma koji, načelno, omogućava određivanje ostatka životnog veka obrtne mašine sa prefabrikovanim namotajima statora, kanurama. Ispitivanja su vršena na celom statoru obrtne mašine, na modelu statora, na pojedinačnim kanurama i na uzorcima uzetim iz tačno određenih oblasti (zona) pojedinačnih kanura.

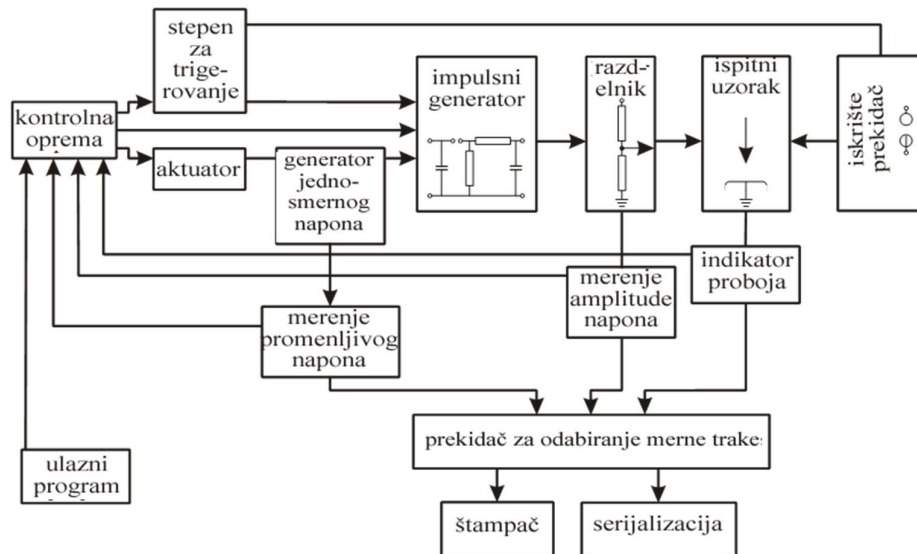
Rezultati svakog od prethodno pomenutih koraka su dali eksperimentalnu potvrdu, pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima, aproksimativnim metodama i naučno-stručnim pretpostavkama da predloženi algoritam daje zadovoljavajuće rezultate. Da bi dobijeni algoritam bio potvrđen, u potpunosti, nije dovoljno da su potvrđeni pojedinačni koraci njegovog izvođenja. To iz prostog i prethodno navedenog razloga da je svaki korak sadržao određene aproksimacije koje su unutar tog samog koraka bile prihvatljive i opravdane što ipak ne znači da njihovo sumarno dejstvo sadržano u konačnom algoritmu to jeste.

Iz tog razloga je izvršena konačna, sumarna, provera dobijenog algoritma. Ovo je bilo moguće pošto se raspolagalo kanurama istog tipa proizvedenim od istog proizvođača koje su pod približno istim uslovima provele u pogonu 5, 10, 15 i 20 godina. Naravno i odgovarajućim novim kanurama. To je omogućilo da se određivanjem ostataka veka trajanja, za određeni kvantil, verovatnoće proveriti da li model vidi vreme ispitivanih kanura koje su provedene u pogonu kao deo utrošenog veka trajanja, tj. da li za poznati period umanjuje ostatak životnog veka.

#### 4.7. Ispitna oprema, postupak merenja i postupak obrade eksperimentalnih rezultata

Metrološki posmatrano kada se planira veliki broj merenja u tehnici visokih napona posebno treba obratiti veliku pažnju izabranoj mernoj opremi. U cilju izbegavanja subjektivne greške ispitivanja i racionalno korišćenje ispitnih postrojenja preporuka je da postupak merenja i akvizicije dobijenih rezultata bude automatizovan. Automatizacija mernog sistema podrazumeva i postojanje, takođe automatizovanog, kontrolnog sistema i odgovarajućeg softvera koji koordinira takvim merno-kontrolisanim sistemom.

Pošto su eksperimenti, u ovom radu, za dobijanja krivih životnog veka, bazirani na postupku eksperimenta rastućim naponom uz svođenje rezultata na odgovarajuće rezultate koji bi se dobili eksperimentima konstantim naponom, korišćen je merni i kontrolni sistem za impulsni napon, slika 4.13.



Slika 4.13 - Šema automatskog mernog i kontrolnog sistema u slučaju primene impulsnog napona

Specifičnost mernog sistema sa slike 4.13 je bila da je ispitni uzorak bio sačinjen od 50 identičnih ispitnih uzoraka koja su dobijali istovremeno identično naponsko opterećenje. Proboj na jednom od tih 50 uzoraka je notiran nakon čega bi probijeni uzorak zamenjivan istim (radi održanja kapacitivnog opterećenja konstantim) pri čemu neki novi proboj tog zamenskog uzorka nije uziman u obzir sa aspekta rezultata merenja.

Uzorci za merenje su bili modeli statora (motorete) sačinjeni od po 5 kanura sa istom predistorijom, slika 4.4. Pored motoreta uzorci su bili i jednoslojni ili višeslojni deo kanure uzet iz zone I maksimalne dužine (iz prethodno ustanovljene činjenice da ti uzorci imaju maksimalan koeficijent korelacije sa kanurom u celini) sa aspekta slučajne promenljive vrednost praga parcijalnog pražnjenja i vrednost probojnog napona. Kada su ispitivanja vršena na motoretama korišćen je petostepeni impulsni generator okidan brzim troelektrodnim okidačem, a kada su ispitivani jednoslojni impulsi iz zone I kanure korišćen je jednostepeni generator. Oblici rastućih (impulsnih) napona su u oba slučaja bila identična, tj. zasnovana na duploekspencijalnom impulsu amplitude znatno veće od očekivanog probojnog napona. Za svaki tip uzorka je određivano po 50 uređenih parova (vrednost probojnog napona, vrednost probojnog vremena).

Sve slučajne veličine vrednost probojnog napona i vrednost probojnog vremena su testirane na sledeći način: 1) odbacivanje sumnjivih rezultata primenom Šoveneovog kriterijuma; 2) primenom U-testa provera pripadnosti slučajnih promenljivih jedne serije merenja jedinstvenom statističkom uzorku; 3) primenom metode centralnih momenata i metode maksimalne verodostojnosti određivani su parametri Vejbulove raspodele za statističke uzorke slučajnih promenljivih probojno vreme i probojni napon i 4) na osnovu dobijenih vrednosti Vejbulovog eksponenta za statistički uzorak slučajnih promenljivih i za statistički uzorak probojni napon i izraza 3.47 određen je eksponent veka trajanja.

Na osnovu dobijenih rezultata crtane su funkcije raspodele statističkog uzorka slučajne promenljive probojno vreme na Vejbulovom papiru verovatnoće i odgovarajuće statistike životnog veka. Takođe su crtane i funkcije izvodnice empirijski dobijene verovatnoće proboja od vremena. Sa karakteristika veka trajanja određivan je eksponent veka trajanja i poreden sa odgovarajućom vrednosti koja je dobijena izrazom 3.47. Već ovde treba naglasiti da su slaganja vrednosti eksponenta životnog veka dobijena na 2 načina bila, u svim slučajevima, više nego zadovoljavajuća što je potvrdilo izabranu metodu i statističku raspodelu, tj. Vejbulovu raspodelu.

Već je više puta napomenuto ali da se ponovi da je merna kombinovana nesigurnost bila oko 5 % (prilog), što je za uslove tehničkih merenja stohastičnih veličina jako dobro.

## 5. REZULTATI DOBIJENI ISPITIVANJEM I DISKUSIJA

U uvodnom poglavlju ovoga rada je ukazano na veliki dijapazon dimenzija statora asinhronih obrtnih električnih mašina, što je takođe i ilustrirano. U konstrukcionoj fazi obrtnih električnih mašina velikih gabarita bilo bi svakako necelishodno početi od prototipa dimenzionog odnosa 1:1 i vršiti ispitivanja u približno realnim okolnostima. Iz toga razloga se pribegava prethodnom ispitivanju ponašanja znatno umanjjenih modela, komponenti i materijala, od kojih bi planirane obrtne mašine trebale biti izrađene (uz obilato korišćenog prethodno nagomilanog iskustva). Tako dobijeni rezultati bi se naknadno, procesom uvećanja, preneli na prototip, ako bi zadovoljavali potrebne uslove. Taj proces prenošenja fragmentalnih rezultata dobijenim uzorcima malih dimenzija na prototip značajnih dimenzija nije nimalo jednostavan, pošto umanjen model kao i mala ispitna epruveta materijala, mogu ispoljiti potpuno različite karakteristike kada se nesrazmerno uvećaju. Da bi se ta mogućnost izbegla često se upotrebljava zakon uvećanja verovatnoće. Na taj način konstruktori se obezbeđuju od utroška vremena i sredstava za izgradnju i ispitivanja prototipa odnosa 1:1.

U ovom radu je primenjena suprotna logika. Naime pošlo se od gotove obrtne električne mašine znatnih dimenzija, koja je u pogonu provela tačno određeno vreme (vreme pod definisanim uslovima) i tražio se odgovor na pitanje koliki je pri tome izvršen utrošak njenog životnog veka (komplementarno posmatrano, koliki je ostatak njenog životnog veka). U uvodnom razmatranju je naglašeno koliko je značajno imati približnu predstavu o odgovoru na to pitanje. Stohastičke pojave koje determinišu rad obrtne mašine podrazumevaju da odgovor na pitanje o proceni ostatka životnog veka sadrži i kvantil verovatnoće očekivanog ispunjenja predviđanja, sa pridruženom statističkom pouzdanosti. Za taj kvantil verovatnoće ispunjenja očekivanog životnog veka neophodno je znati uslove pod kojim je obrtna mašina bila u pogonu, tj koji su uslovi uticali na njen životni vek i tehnološke postupke njene izrade uz poznavanje karakteristika primenjenih materijala.

Da bi se ostvario uslov suprotnosti logike, što je istaknuto, potrebno je sa gotove obrtne mašine izdvojiti jedan sklop koji je posebno reprezentativan za trajanje njenog životnog veka (po mogućnosti što manji i što reprezentativniji) i njegovim ispitivanjem doći do maksimalnog broja relevantnih podataka o ostatku životnog veka obrtne mašine. Pošto je već ukazano na osnovu kojih činjenica se pouzdano očekuje da je izolacija statora obrtne mašine kritična sa aspekta njenog životnog veka bilo je logično krenuti od izolacije statora obrtne mašine, njenih vitalnih elemenata tehnološkog postupka izrade primenjenih materijala, to jest odrediti šta je to što na mikroskopskom nivou određuje ostatak životnog veka izolacije statora obrtne mašine. Na taj način bi bilo moguće jednostavnim, brzim i materijalno povoljnim eksperimentom doći do podatka o ostatku životnog veka obrtne mašine i dogovarajuće verovatnoće.

### 5.1. Izbor sklopa asinhronne obrtne električne mašine i fizičke pojave na mikroskopskom nivou relevantne za procenu životnog veka izolacije statora

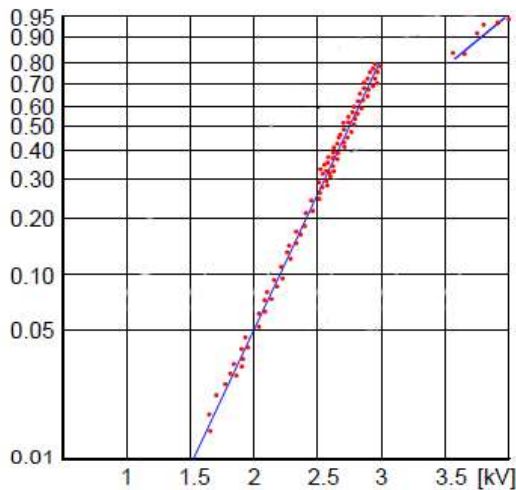
Potrebno je napomenuti i to da je prilikom ispitivanja bilo kojih efekata porasta verovatnoće, nužno proveriti pitanje nezavisnosti ispitivane pojave. Ako je nezavisnost osigurana, dobijeni matematički izraz zakona porasta verovatnoće se može smatrati validnim. Da bi se dobio jasan prikaz zakona porasta verovatnoće za teorijske funkcije raspodele treba uzeti samo one koje se ponašaju po očekivanim fizičkim zakonima, naročito u asimptotskim domenima.

Pošto je stator obrtnih mašina izgrađen od strukturnih komponenta-kanura, i pošto su ispitne pojave između kanura tokom pogona nezavisne, a same kanure su izrađene i izolovane na identičan način, ne postoje smetnje da se na njih primeni zakon porasta verovatnoće. Imajući u vidu sve iznesene podatke bilo je logično da se u prvom koraku ispitivanja izolacije statora obrtne mašine usmeri na ispitivanje jedne ili više kanura izvađenih iz nje. U prilog toga treba naglasiti i da sve kanure u statoru obrtne mašine trpe identična naprezanja u pogonu.

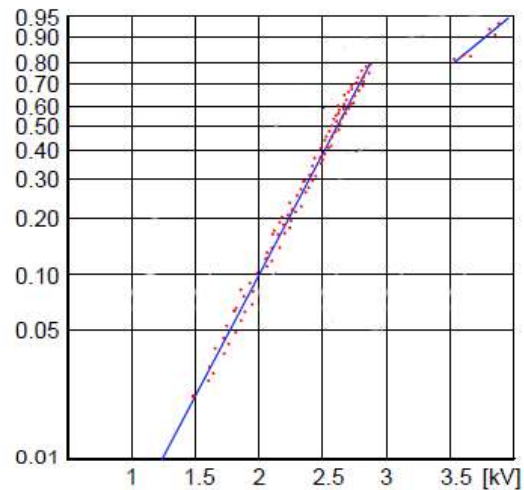
### 5.1.1. Rezultati i diskusije o primenljivosti ispitivanja slučajne promenljive prag parcijalnog pražnjenja na predikciju stanja izolacionog sistema statora

Eksperimentalni postupak kojim su dobijeni rezultati u ovom poglavlju opisani su u poglavlju 4, a statistički metod obrade ovih rezultata opisan je u poglavlju 3. Svi eksperimenti su vršeni na asinhronim obrtnim električnim mašinama proizvođača Sever-Subotica istog tipa. Iz istih mašina su uzimane korišćene i nove kanure. Pri čemu je vreme provedeno u pogonu korišćenih kanura bilo poznato.

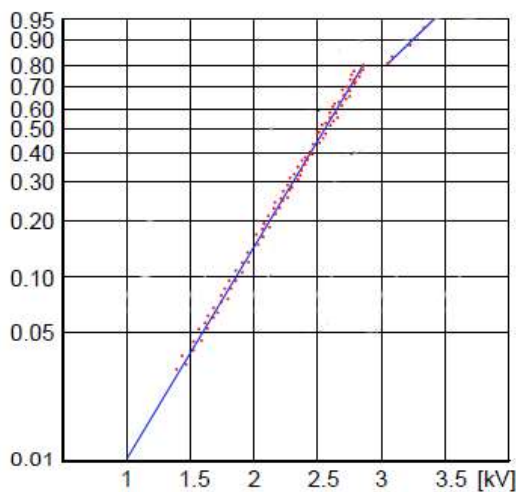
Na slici 5.1 prikazane su statističke raspodele slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja dobijene eksperimentalno na papiru troparametarske Weibulove verovatnoće za stator obrtne mašine nakon pet godina u pogonu i za pet, četiri, tri, dve i jednu kanuru (prethodno korigovane zakonom porasta verovatnoća) uzetu iz tog statora obrtne mašine i postavljene u stege kao na slici 4.4.



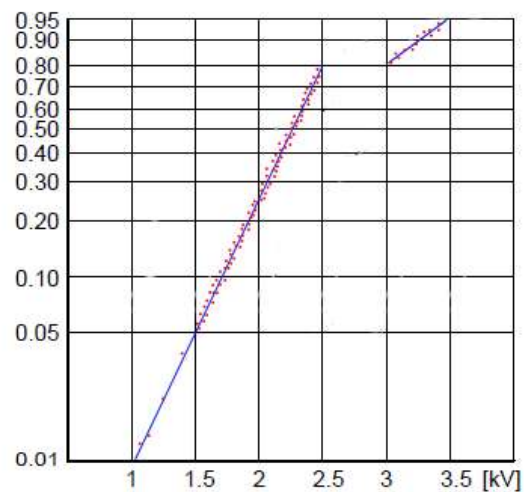
a)



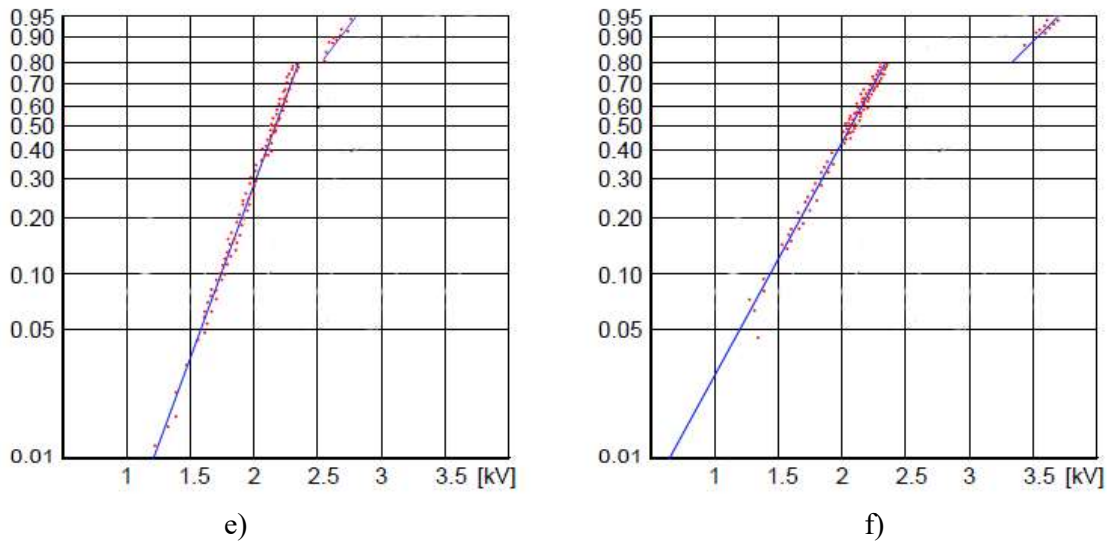
b)



c)

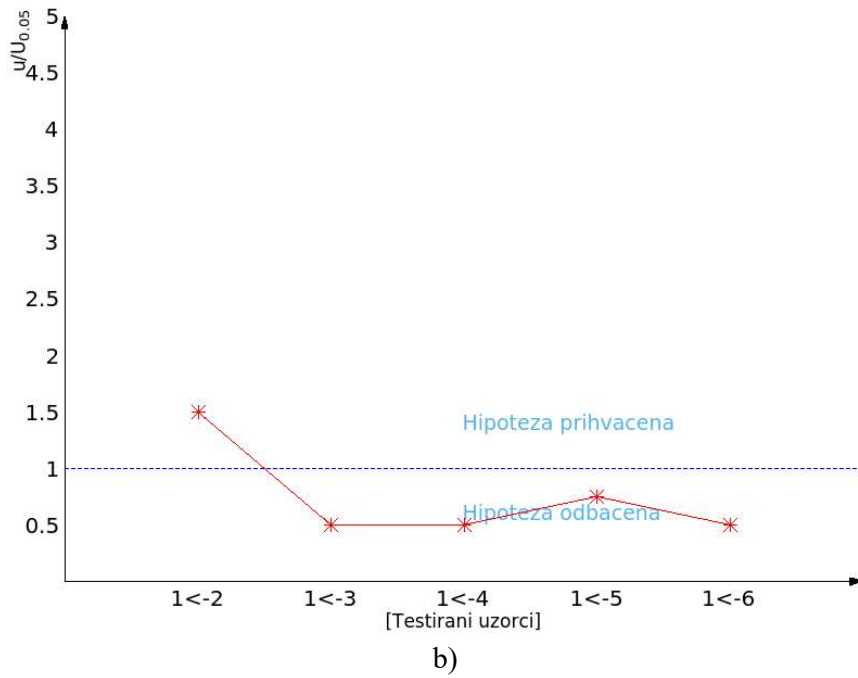
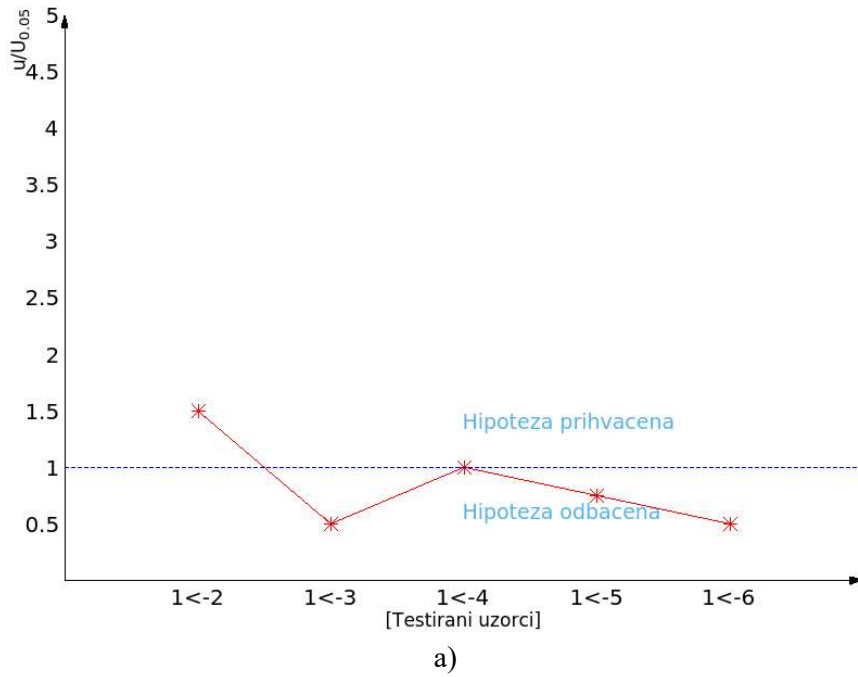


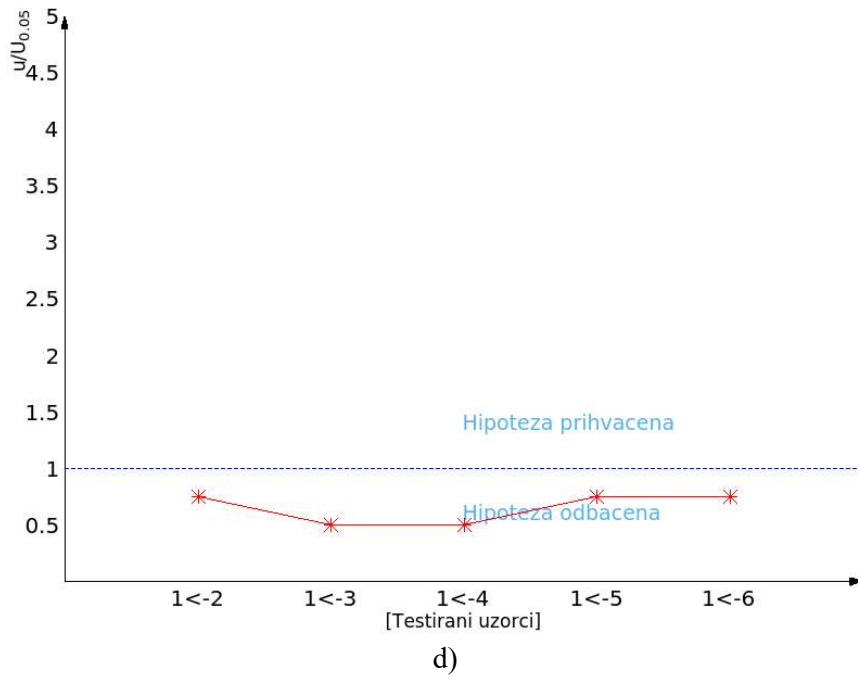
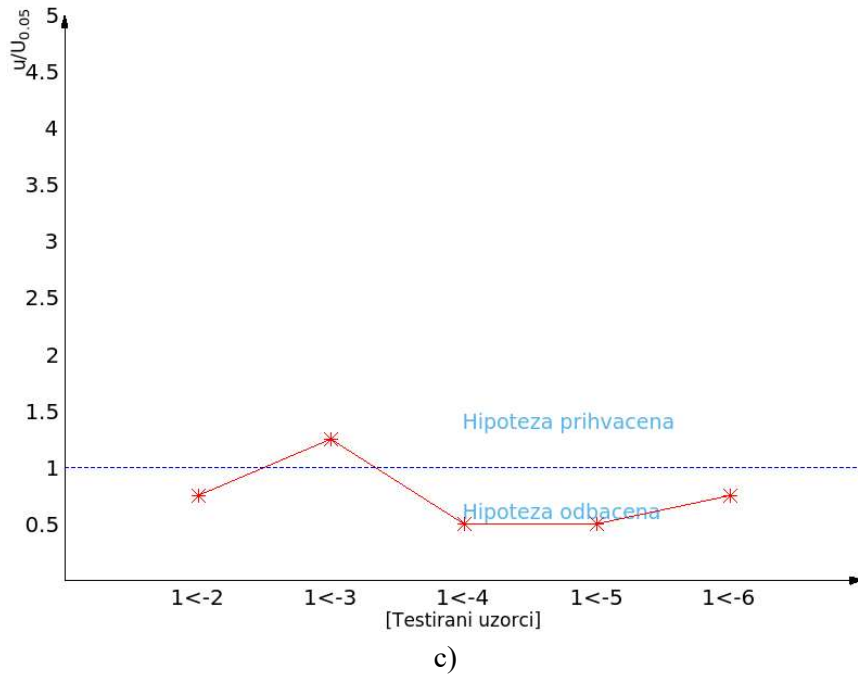
d)

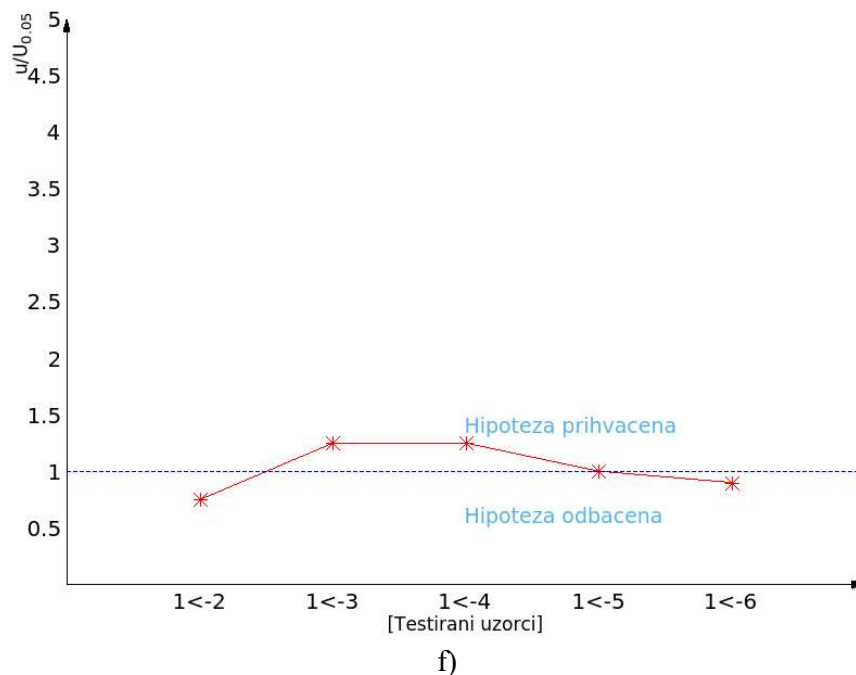
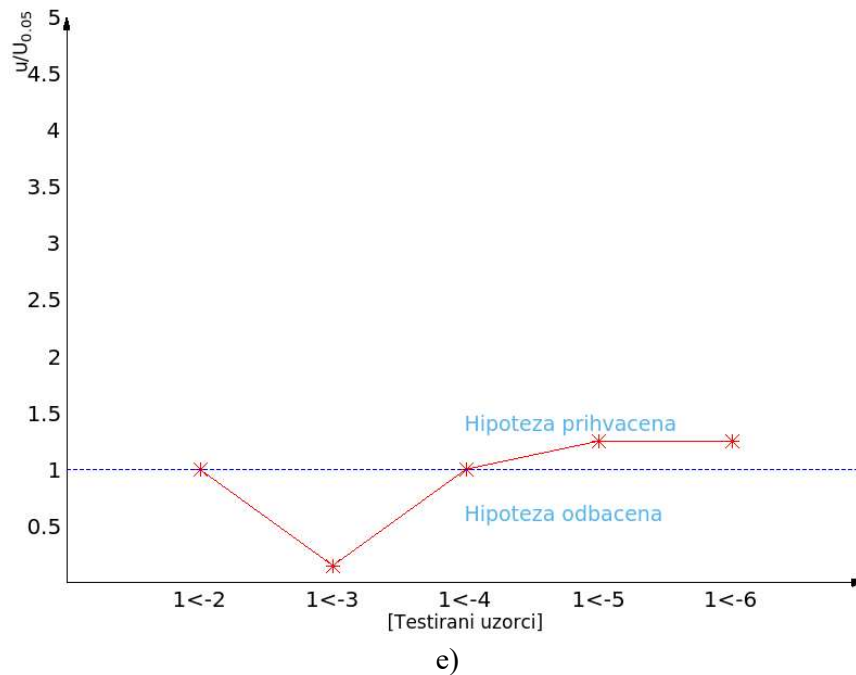


Slika 5.1 – Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja dobijene eksperimentalno na papiru troparametarske Weibulove verovatnoće: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.

Rezultati prikazani na slici 5.1 potvrđuju prethodno iznešeno očekivanje da slučajne veličine praga parcijalnog pražnjenja pripadaju dominantno troparametarskoj Weibulovoj raspodeli. Dominantno, pošto je na slici 5.1 uočljivo da najveći broj slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja na jednoj pravoj (pripada jednoj troparametarskoj Weibulovoj raspodeli), ali se izdvaja oko 10 % slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja koji pripadaju nekoj drugoj, takođe troparametarskoj Weibulovoj raspodeli. Takav zaključak je potvrđen i primenom  $\chi^2$  testa i testa Kolmogorova sa statističkim nesigurnostima 8 % i 9 %, respektivno. Ove statističke nesigurnosti su, ipak, malo veće vrednosti da bi tvrdnja o pripadnosti eksperimentalno dobijenih vrednosti slučajne promenljive jedinstvenoj troparametarskoj Weibulovoj raspodeli bila u potpunosti validna. To je vidljivo i sa kumulativnih raspodela prikazanih na slici 5.1, koje u svim slučajevima odstupaju od prave linije pri najvećim vrednostima slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja. Iz tog razloga su svi statistički uzorci od po 100 vrednosti slučajne promenljive, dobijenih eksperimentalno (prethodno korigovane zakonom porasta verovatnoće) i prikazanih na slici 5.1, podeljeni na po 5 hronoloških uzoraka od 20 slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja i na njih je primenjen U-test statističke nesigurnosti 5 %. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 5.2 (na slici ima 6, a ne 5 poduzoraka pošto je broj slučajnih promenljivih bio veći od 100 iz prethodno objašnjenog razloga).





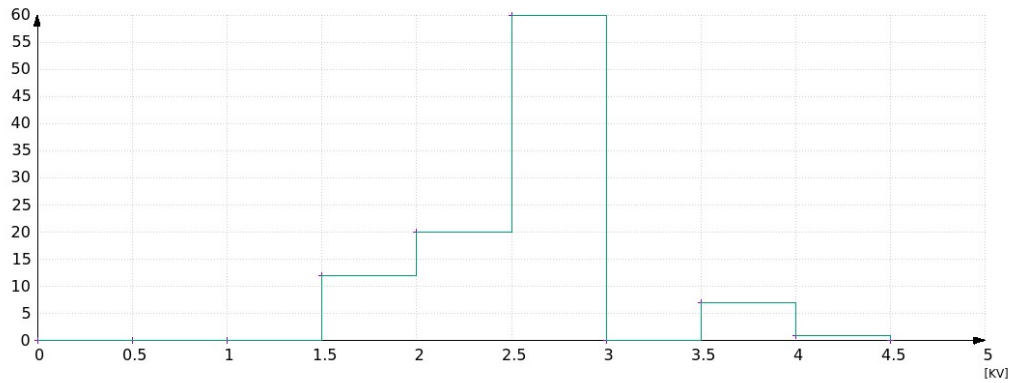


Slika 5.2 - Rezultati U-testa primenjenog na hronološke poduzorke od 20 slučajnih promenljivih praga parcijalnih pražnjenja za sve statističke uzorke od po 100 vrednosti slučajnih promenljivih praga parcijalnih pražnjenja: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.

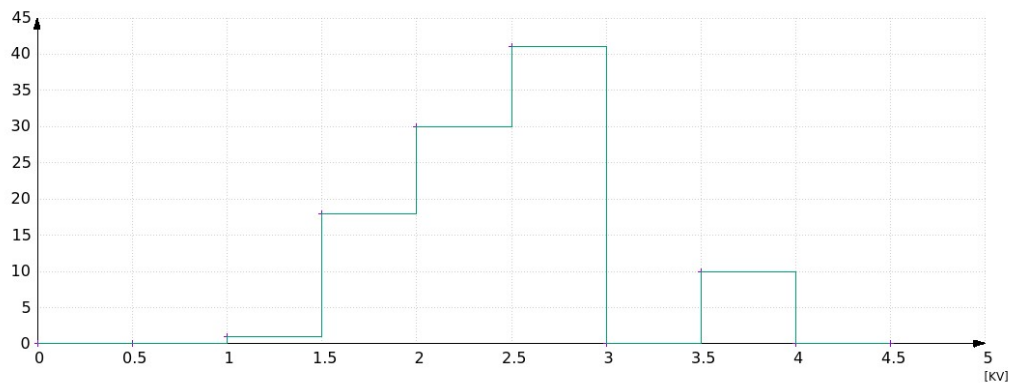
Prikazani rezultati U-testa sa statističkom nesigurnošću od 5 % ukazuju da je nulta hipoteza neispunjena. Analizom kumulativnih raspodela prikazanih na slici 5.1 i imajući u vidu prethodnu fizičku analizu o ponašanju karakteristika izolacionih materijala u skladu sa raspodelama ekstremnih vrednosti može se pretpostaviti da se eksperimentalno dobijene slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja ponašaju prema složenoj raspodeli aditivnog tipa koju čine 2 ili 3



troparametarske Vejbulove raspodele. Da bi se ova pretpostavka proverila statistički uzorci od po 100 eksperimentalnih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja (prethodno korigovane zakonom porasta verovatnoće) prikazani su kao histogrami klase  $0.5(1+3.3\log n)^4$  ( $n$  je veličina statističkog uzorka), slika 5.3.

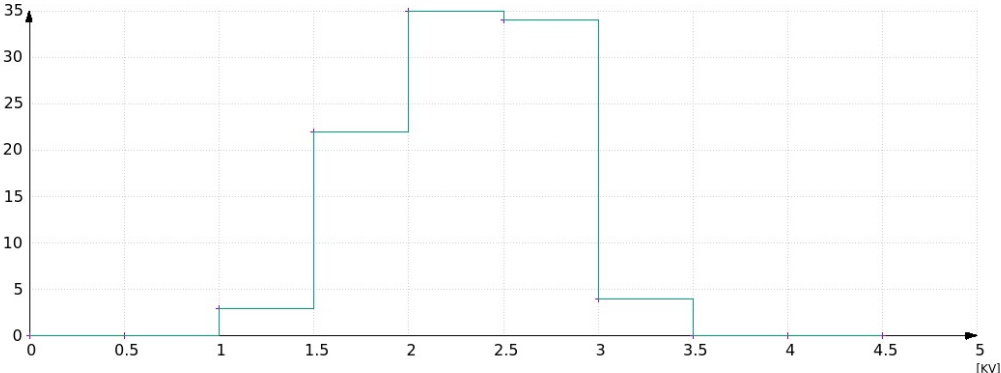


a)

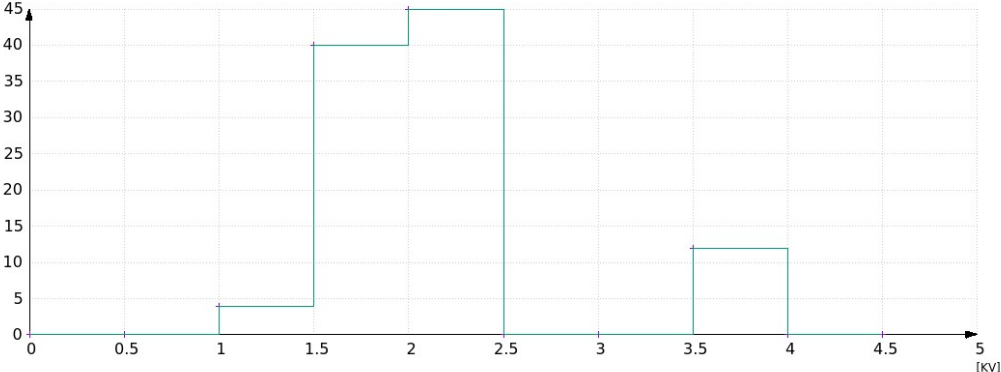


b)

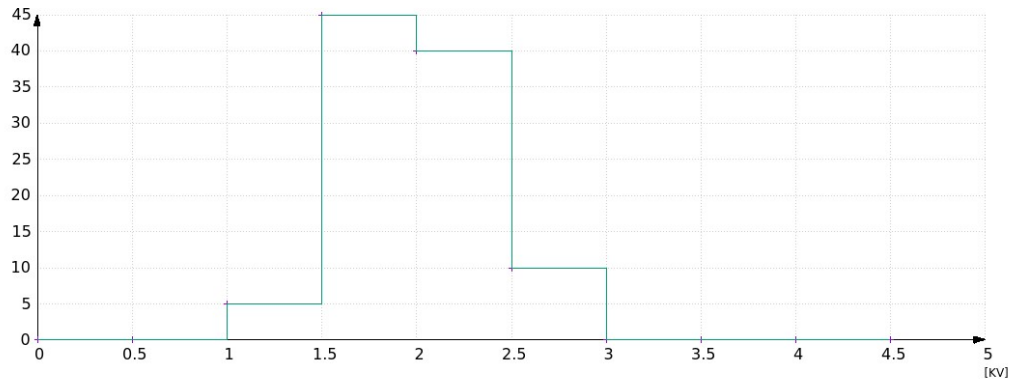
<sup>4</sup> Preporuka Svetske metrološke organizacije je da se za ovde korišćenu veličinu statističkog uzorka koristi ova klasa histograma. Klasa histograma se koristi kao imenilac u razlomku kojim se određuje širina histogramskih apcinskih razlika. To se radi tako što se nezavisna promenljiva koja je korišćena (u konkretnom slučaju od 0 V do 6 V) deli sa klasom histograma. Pri tome je dozvoljeno zaokruživanje do oko 10 %. Pored primenjivane klase histograma koristi se i  $\sqrt{n}$  kao i  $1 + \frac{1}{2}\sqrt{n}$  u slučaju većih statističkih uzoraka (uz zaokruživanje do 5 %). Histogram bez klase korišćenja je metrološki neprihvatljiv.



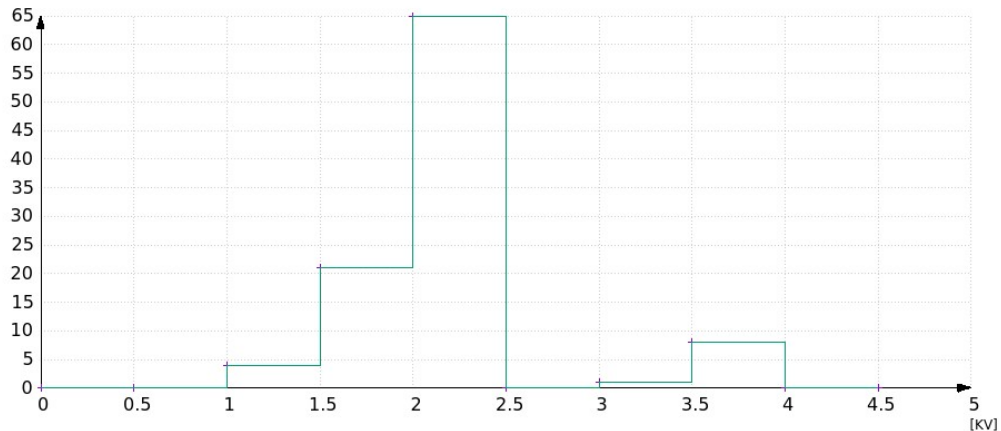
c)



d)



e)



f)

Slika 5.3 - Histogrami slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja dobijene eksperimentalno za sve statističke uzorke na bazi statističkog uzorka od po 100 vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnih pražnjenja: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.

Histogrami slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja dobijeni eksperimentalno potvrđuju pretpostavku da sve slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja na svim ispitivanim uzorcima pripadaju složenoj raspodeli aditivnog tipa koja se strogo gledano sastoji od 3 troparametarske Vejbulove raspodele. Međutim, na svim histogramskim prikazima se jasno vide dve

statističke raspodele. Jedna se javlja pri nižim vrednostima napona praga pražnjenja (1 kV – 2.5 kV) i sadrži dominantan broj merenih slučajnih promenljivih. Druga se javlja pri višim vrednostima napona praga parcijalnog pražnjenja (3 kV – 4 kV) i sadrži znatno manji broj slučajnih promenljivih. Naknadnom analizom sa strožijom klasom histograma, manjom statističkom nesigurnošću (1 %) može se pokazati da se i prva statistička raspodela sastoji od dve, veoma bliske statističke raspodele, što u inženjerskoj praksi nije relevantno. Naime, u inženjerskoj praksi se i statistička nesigurnost od 5 % smatra strogim uslovom. Objašnjenje ove pojave se može naći u prethodno opisanom tehnološkom postupku izrade kanure. Kanura sa slike 1.8 je podeljena u 3 zone. Zona I koja je, nakon izolacije pretrpela dvostruko uvrtnanje, zona II koja je, nakon izolacije pretrpela jednostruko uvrtnanje i zona III koja, nakon izolacije nije pretrpela nikakvo uvrtnanje. Pošto proces uvrtnja snopa bakarnih provodnika dovodi do istežanja (a možda i pucanja) izolacije jasno je da je izolacija kanure u zonama I i II nakon tehnološkog postupka bogatija sa slabim mestima izolacije od zone III. Pored pucanja izolacije kao posledice uvrtnja u zoni I može doći i do deformacije bakarnog provodnika sa stvaranjem mesta pogodnih za pojavu parcijalnih pražnjenja. Pošto su eksperimentalno ispitivane kanure iz obrtne mašine nakon 5 godina u pogonu, može se očekivati da se situacija sa izolacijom zona I i II tokom eksploatacije obrtne mašine pogoršava u odnosu na izolaciju zone III pošto se zona III kanure nalazi u žljebovima statora i manje je izložena nepravilnim oscilacijama od zona I i II kanure koje se ne nalaze u žljebovima statora. Pored toga sa slike 5.1 se uočava da sa povećanjem broja kanura raste vrednost praga parcijalnog pražnjenja u zoni III u odnosu na odgovarajuće vrednosti u zoni I i II. Najveća razlika između vrednosti slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja koji se javljaju u zoni III prema zonama I i II je za ceo stator obrtne mašine. To se objašnjava dodatnom vezivnom izolacijom i pritiskom žljeba na kanuru. Pritisak kanure od strane druge kanure objašnjava i povećanje vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja u slučaju ispitivanja dva, tri, četiri, i pet kanura u stezi.

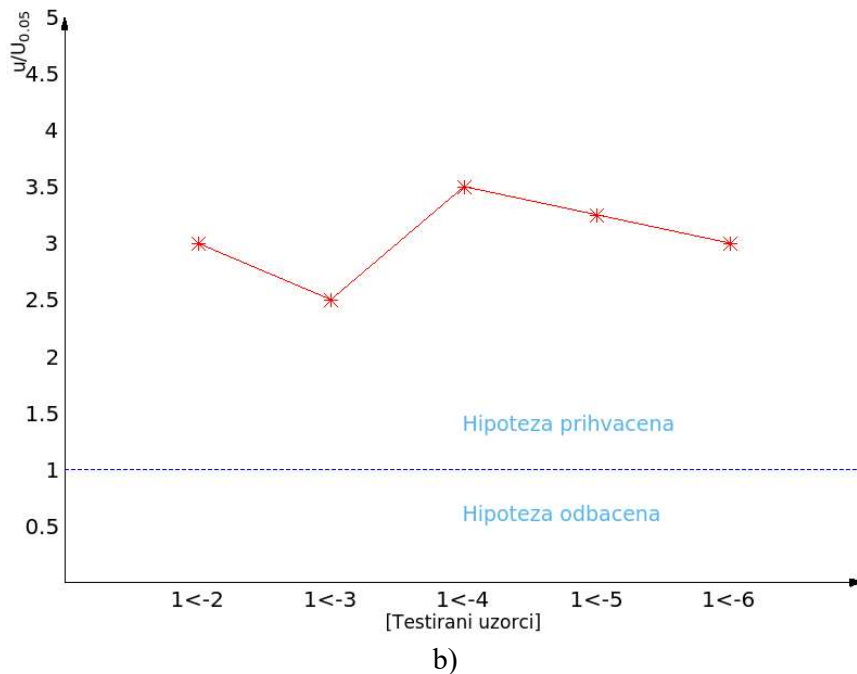
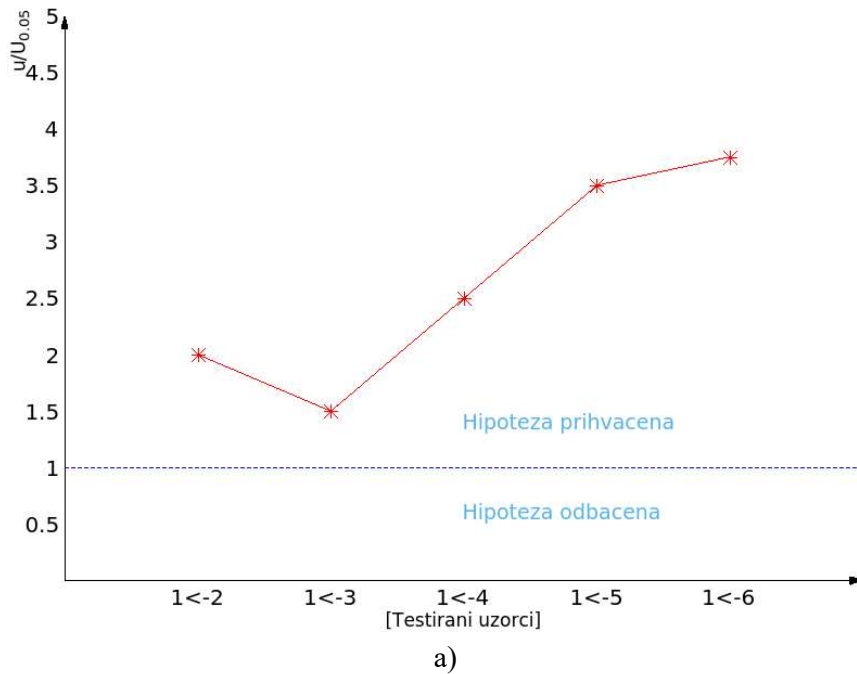
Kao potvrda ovakvog objašnjenja rezultata dobijenih na slikama 5.1 – 5.3 može da posluže rezultati termovizijskog posmatranja jedne kanure u potpuno zamračenoj prostoriji. Uključenje napona i uključenje termovizijskog monokla je vršeno istovremenim trigerovanjem. Termovizijski monokl je snimao kanuru sve vreme do pojave svetlosti (tj. parcijalnog pražnjenja). U trenutku pojave parcijalnog pražnjenja automatski su isključivani napon i termovizijska kamera. Pritom je memorisana vrednost napona (napon praga parcijalnog pražnjenja) i ceo snimak dobijen monoklom. Postupak je ponovljen sa 100 novih kanura. Vidljiva pojava parcijalnog pražnjenja se najčešće pojavljivala u zonama I i II i uvek je korespondirala nižim vrednostima napona praga parcijalnog pražnjenja prikazanim na slici 5.3. Višim vrednostima napona praga parcijalnog pražnjenja, slika 5.3, su odgovarale pojave u zoni III kanure. Rezultati dobijeni termovizijskim posmatranjem pojave parcijalnog pražnjenja prilikom merenja 100 vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja dati su u tabeli 5.1.

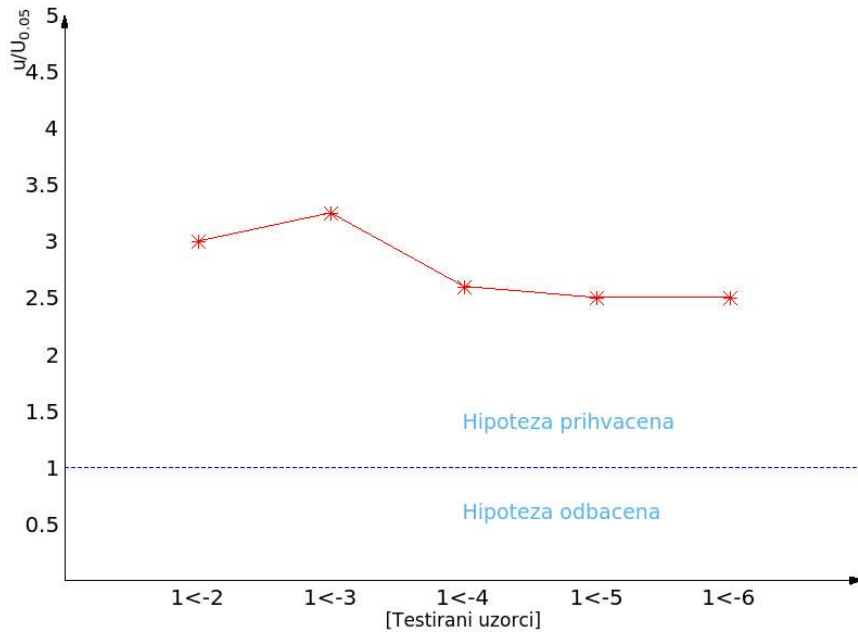
**Tabela 5.1: Rezultati dobijeni termovizijskim posmatranjem i istovremenim merenjem praga parcijalnog pražnjenja**

	ZONA I	ZONA II	ZONA III
<b>Broj pojava parcijalnog pražnjenja n po zonama kanure (slika 1.8)</b>	55	40	5
<b>Vrednost napona praga parcijalnog pražnjenja [kV]</b>	(1.55 kV, 3 kV)	(1.55 kV, 3 kV)	(3.5 kV, 4 kV)

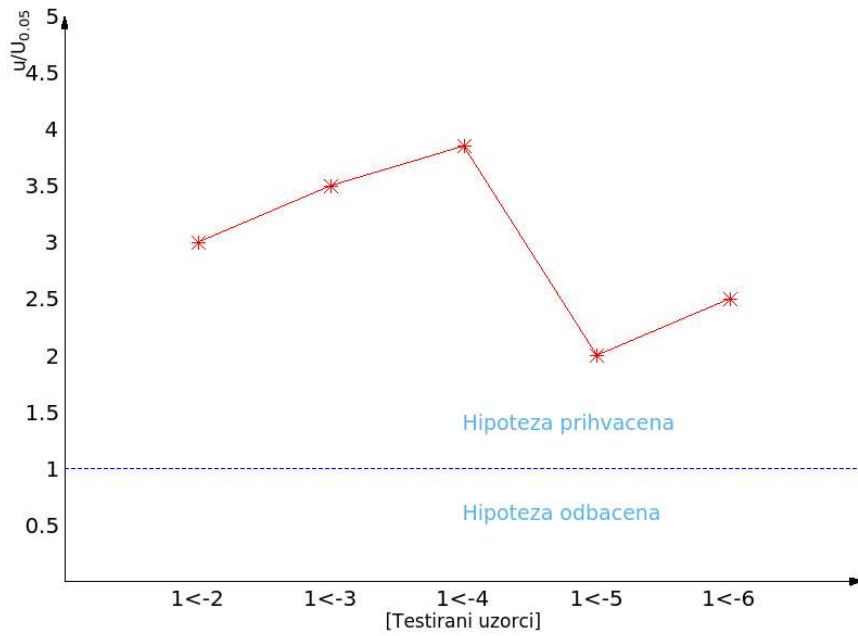
Nakon ovih razmatranja je ponovljen postupak ispitivanja pripadnosti svih eksperimentalno dobijenih statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja jedinstvenom statističkom uzorku primenom U-testa, s tim što su iz svih statističkih uzoraka izdvojene vrednosti

slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja koje pripadaju pojavi pražnjenja u zoni III, (što je značilo da je odbačeno oko 5 % - 10 % slučajnih promenljivih, tj. da je ispitivani uzorak zadovoljavao t-test o minimalno potrebnoj veličini statističkog uzorka za kompetentnu statističku analizu I nakon toga korigovane na zakon porasta verovatnoće) tabela 5.1. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 5.4.

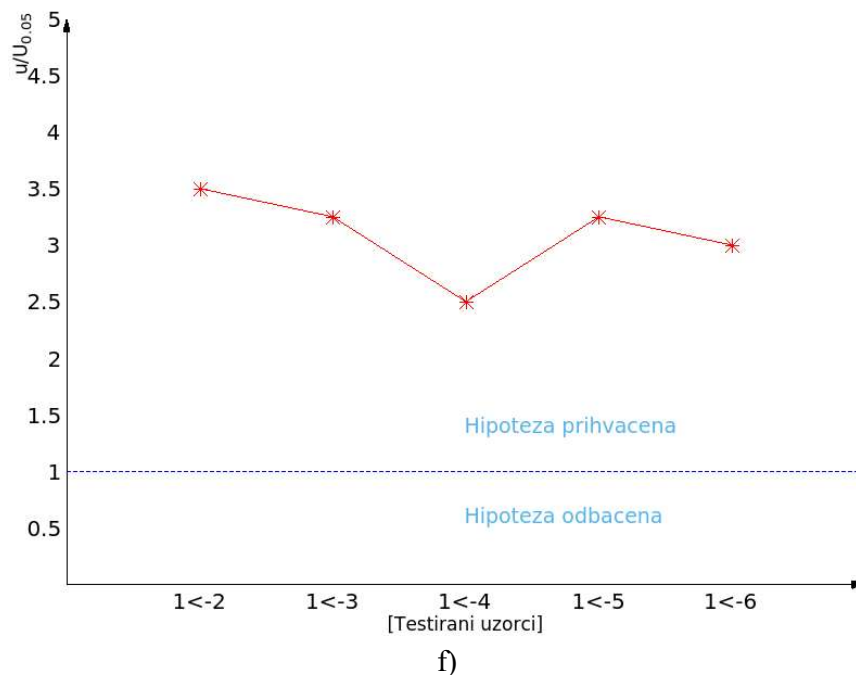
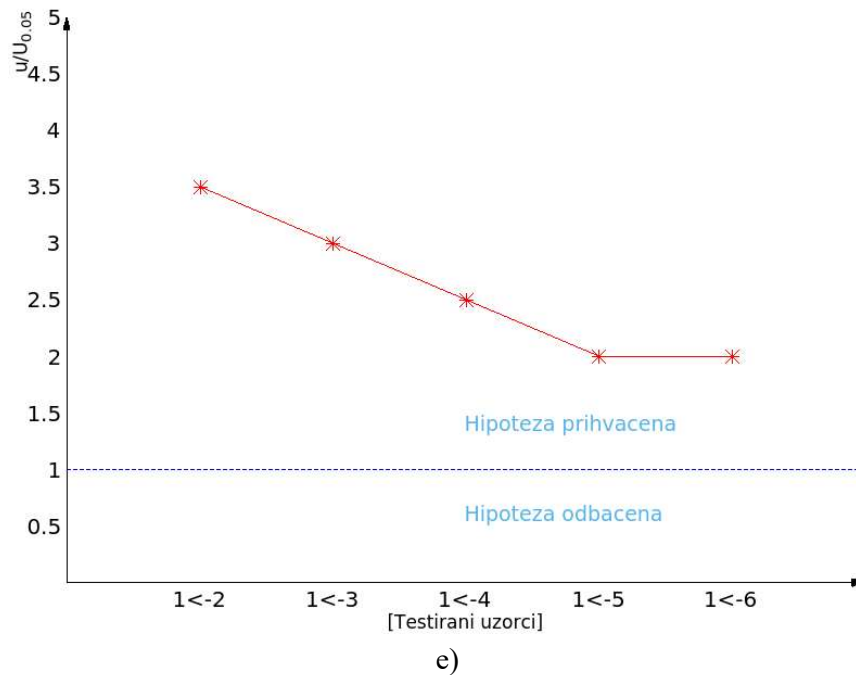




c)



d)



Slika 5.4 - Rezultati U-testa na hronološki pročišćene poduzorke od 20 (ili manje) slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja za sve statističke uzorke od po 100 (ili manje) vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnih pražnjenja: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.

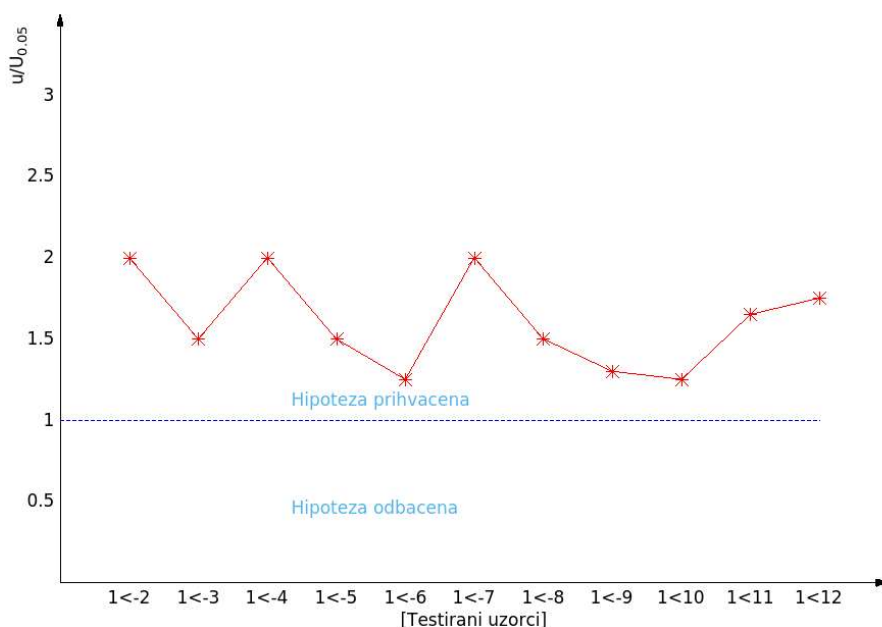
Rezultati prikazani na slici 5.4 potvrđuju prethodno iznešeno očekivanje da će slučajne promenljive nakon odbacivanja vrednosti slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja koje su dobijene iz zone III ispitivanih kanura, pripadati jedinstvenoj statističkoj raspodeli.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.4 može se tvrditi da slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja nakon prečišćenja statističkog uzorka od slučajnih veličina koje se javljaju u

zoni III (prikazane na papiru troparametarske Vejbulove raspodele) odgovaraju pravoj liniji (tj. pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli). Ovde treba napomenuti da je i raspodela slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja dobijena eksperimentalno i prikazana na papiru troparametarske Vejbulove verovatnoće, nakon prečišćavanja statističkih uzoraka od slučajnih promenljivih koje se javljaju u zoni III, odgovarala pravoj liniji. Isti rezultat, samo kvantifikovan, dobijen je  $\chi^2$ -testom i testom Kolmogorova koji su potvrdili da slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja svih statističkih uzoraka nakon odbacivanja slučajnih promenljivih koje nastaju u zoni III kanure pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli sa statističkom nepouzdanošću 2 % ( $\chi^2$ -test) i 2.5 % (test Kolmogorova)<sup>5</sup>.

Na slici 5.5 je prikazan rezultat U-testa primenjenog istovremeno na svih 6 statističkih uzoraka dobijenih za ceo stator obrtne mašine, za 5, za 4, za 3, za 2 i za 1 kanuru, pri čemu su iz svih statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja bile odstranjene vrednosti praga parcijalnog pražnjenja koje su nastale u zoni III kanura. Takođe, slučajne promenljive svih statističkih uzoraka su korigovane u skladu sa zakonom porasta verovatnoće. U ovom slučaju je to bilo jednostavno pošto se radilo o diskretnoj verovatnoći, jednačina 3.6, i da bi se verovatnoća svela na jednu kanuru računata je verovatnoća za  $n = 1, 2, 3, 4, 5$  i 50. Za svaki statistički uzorak je računato standardno odstupanje i srednja vrednost. Na osnovu tih vrednosti su preračunate vrednosti pojedinačnih slučajnih promenljivih i formirani novi statistički uzorci koji su mogli biti svedeni na jedinstveni uzorak jednostavnim spajanjem da pripadaju istoj statističkoj raspodeli. To je dokazano analizom varijanse za sve eksperimentalno dobijene statističke uzorke, slika 5.5.

Svaki od 6 statističkih uzoraka od 100 (ili manje) vrednosti slučajne promenljive je deljen hronološki na po dva poduzorka od 50 (ili manje) slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja koji su onda, primenom U-testa, testirani na pripadnost jedinstvenoj statističkoj raspodeli (uz prethodno korigovanje zakonom porasta verovatnoće), slika 5.6.



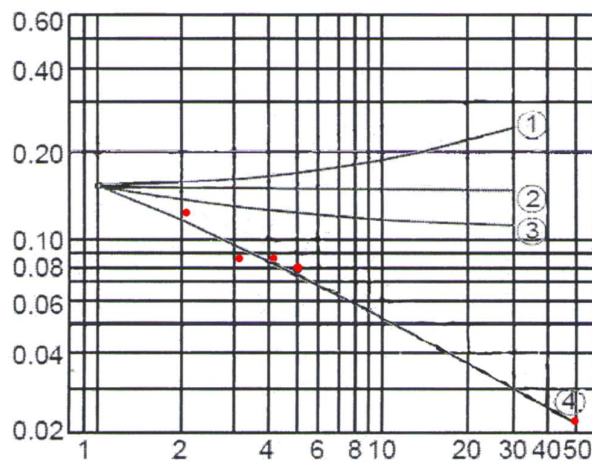
Slika 5.5 - Rezultati U-testa na objedinjenim i prečišćenim hronološkim poduzorcima od oko 50 slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja za sve statističke uzorke od oko 100 vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja, dobijeni za ispitne setove kanura i ceo stator

<sup>5</sup> Podaci o statističkoj nepouzdanosti testa Kolmogorova i  $\chi^2$ -testa su dobijeni na osnovu komercijalnog programa koji ih je određivao metodom maksimalne verodostojnosti.



Rezultati prikazani na slici 5.5 nesumnjivo pokazuju da sve vrednosti slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja nastale u zonama I i II kanure (gde i dominantno nastaju), prethodno korigovane zakonom porasta verovatnoće, pripadaju jedinstvenom statističkom uzorku. Rezultati prikazani na slici 5.4 pokazuju da statistički uzorci slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja nastale u zonama I i II kanure odgovaraju troparametarskim Vejbulovim raspodelama. Međutim, to još uvek ne znači da za statističke uzorke slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja važi zakon porasta verovatnoće što bi značilo da se rezultati dobijeni ispitivanjem slučajne promenljive praga parcijalnih pražnjenja jedne, proizvoljno uzete kanure iz statorskog namotaja obrtne mašine može doneti zaključak o odgovarajućoj slučajnoj promenljivoj za celu izolaciju statora iz kojeg je ta kanura uzeta. Da bi to proverili prvo će se ispitati zavisnost koeficijenta varijacije od faktora porasta.

Na slici 5.6 prikazane su eksperimentalno dobijene vrednosti koeficijenta varijacije statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja, dobijene eksperimentalno, za stator obrtne mašine nakon 5 godina u pogonu i za 5, 4, 3, 2 i 1 kanuru uzetu iz tog statora obrtne mašine zajedno s teorijskim krivama za duplo-eksponencijalnu raspodelu, dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu, normalnu raspodelu i troparametarsku Vejbulovu raspodelu, prema tabeli 3.2.

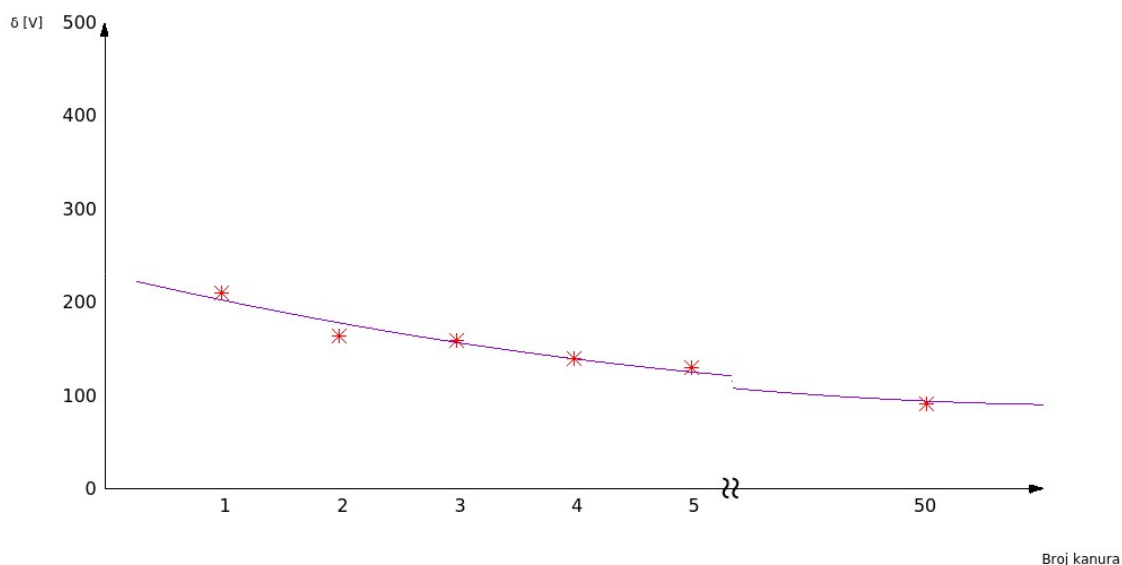


Slika 5.6 - Zavisnost koeficijenta varijacije statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnih pražnjenja od faktora uvećanja n (broja kanura) zajedno sa odgovarajućim teorijskim zavisnostima za: 1) duplo-eksponencijalnu raspodelu; 2) Normalnu raspodelu; 3) dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu; 4) troparametarsku Vejbulovu raspodelu

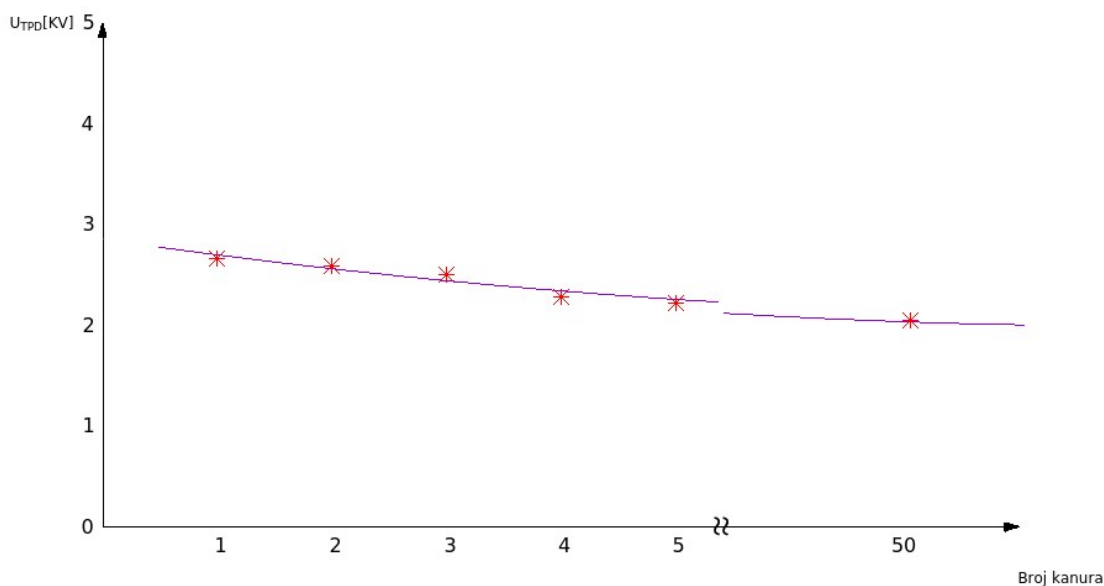
Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.6 može se sa sigurnošću tvrditi da za slučajnu promenljivu praga parcijalnog pražnjenja u statoru obrtne mašine važi zakon porasta verovatnoće. Takav zaključak opravdava u potpunosti primenu zakona porasta verovatnoće primenjivan prethodno i potvrđuje tako dobijene statističke rezultate.

Ovaj zaključak je potvrđen i kvantitativnom proverom primenljivosti izraza 3.40 - 3.42 na eksperimentalno dobijene statističke uzorke slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja za ceo stator, 5, 4, 3, 2 i 1 kanure. Na slici 5.7 prikazane su krive dobijene na osnovu izraza 3.40 - 3.42. Naime, dijagrami na slici 5.7 nastali su tako što je na osnovu svih eksperimentalno dobijenih i naknadno prečišćenih statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja, izvršeno izračunavanje srednje vrednosti napona praga parcijalnog pražnjenja i standardnog odstupanja. Izračunavanje ovih vrednosti je vršeno momentnom metodom (i potvrđeno metodom maksimalne verodostojnosti). Nakon toga su vrednosti standardnog odstupanja u zavisnosti od faktora porasta, fitovane izrazom 3.40 uz primenu vrednosti standardnog odstupanja  $\sigma_1$  dobijenog na prethodno opisani način, tj. na osnovu prečišćenog statističkog uzorka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja. Kao rezultat fitovanja dobijena je nova vrednost parametra k. Na osnovu vrednosti parametra k dobijenog fitovanjem nacrtana je kriva prema izrazima 3.40 i 3.41. Na istom

dijagramu na kojem je nacrtana kriva zavisnosti srednje vrednosti praga parcijalnog pražnjenja od faktora povećanja prema izrazima 3.40 i 3.41 ucrtane su odgovarajuće srednje vrednosti praga parcijalnih pražnjenja dobijenih na osnovu eksperimentalnih statističkih uzoraka i odgovarajuće vrednosti dobijene zamenom parametra  $k$  svakog statističkog uzorka posebno u izrazu 3.40.



a)



b)

Slika 5.7 - a) zavisnost standardnog odstupanja statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja od faktora porasta (dobijenog fitovanjem eksperimentalnih rezultata izrazom 3.41 po Vejbulovom eksponentu); b) zavisnost srednje vrednosti statističkih uzoraka slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja od faktora porasta (dobijenog zamenom određene vrednosti za najbolji fit,  $k = 0.111$ , u izrazu 3.40)

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.7 može se potvrditi zaključak donesen na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.6, tj. da zakon porasta verovatnoće važi za kanure statora obrtne

električne mašine i time je opravdana primena zakona porasta verovatnoće za korekciju slučajnih promenljivih za primenu U-testa za celokupan statistički uzorak nastao hronološkim spajanjem pojedinačnih uzoraka, slika 5.5.

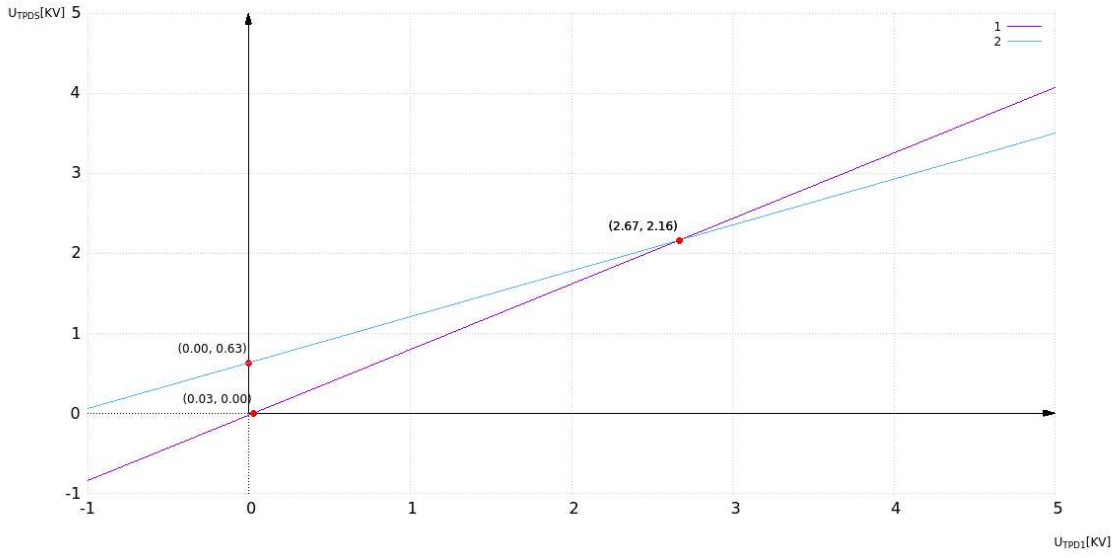
Nakon što je nesumnjivo ustanovljeno važenje zakona porasta verovatnoće za slučajnu promenljivu praga parcijalnog pražnjenja treba još ispitati da li statistički uzorak slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja određen eksperimentalno na jednoj kanuri stoji u korelaciji sa statističkim uzorkom slučajne promenljive praga parcijalnog pražnjenja za ceo stator obrtne mašine i koliki je koeficijent korelacije. Naime, ako korelacija između ovih fizičkih veličina postoji i ako je vrednost koeficijenta korelacije bliska 1, onda su ispitivanja praga parcijalnog pražnjenja sprovedena na jednoj kanuri reprezentativna i odgovarajuća za ceo stator. U tabeli 5.2 su date vrednosti koeficijenta korelacije zajedno sa intervalom poverenja statističkih uzoraka od po 100 slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja za uzorak 1, 2, 3, 4 i 5 kanura, kao i za ceo stator. Koeficijenti korelacije i intervali poverenja proračunati su na osnovu izraza 3.17 i 3.18.

**Tabela 5.2: Koeficijent korelacije sa intervalom poverenja**

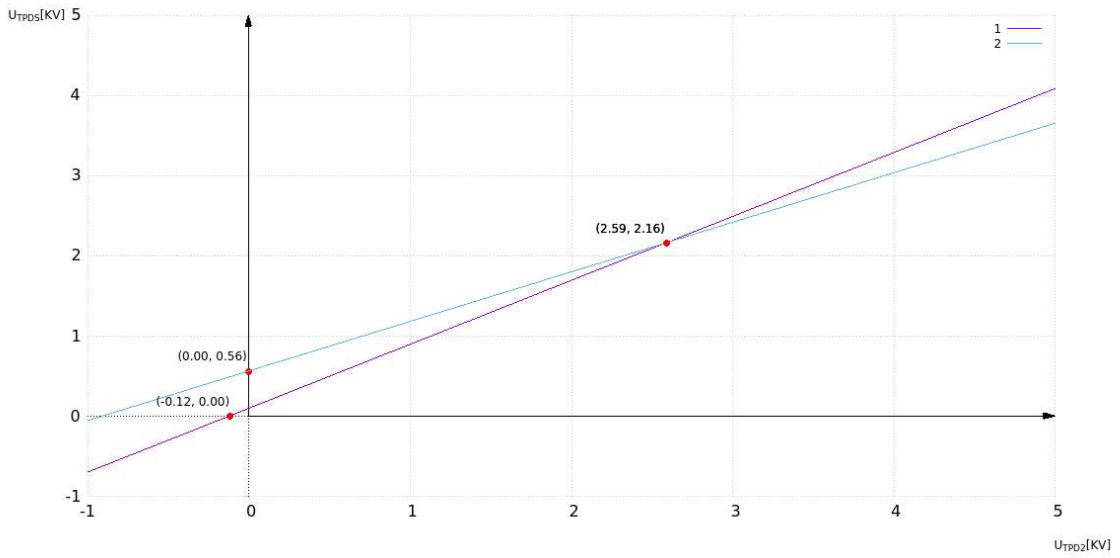
	<b>Koeficijent korelacije</b>	<b>Interval poverenja</b>
<b>jedna kanura-ceo stator</b>	0.88	0.707 – 0.910
<b>dve kanure-ceo stator</b>	0.91	0.761 – 0.801
<b>tri kanure-ceo stator</b>	0.92	0.802 – 0.810
<b>četiri kanure-ceo stator</b>	0.94	0.812 – 0.821
<b>pet kanura-ceo stator</b>	0.95	0.851 – 0.824

Potvrda rezultata prikazanih u tabeli 5.2 su regresione prave date na slici 5.8. Na slici 5.8 su prikazane regresione prave parova: a) jedna kanura-ceo stator; b) dve kanure-ceo stator; c) tri kanure-ceo stator; d) četiri kanure-ceo stator i e) pet kanura-ceo stator<sup>6</sup>, (jednačine regresionih pravih date su u potpisu slike i označene su brojevima 1 i 2).

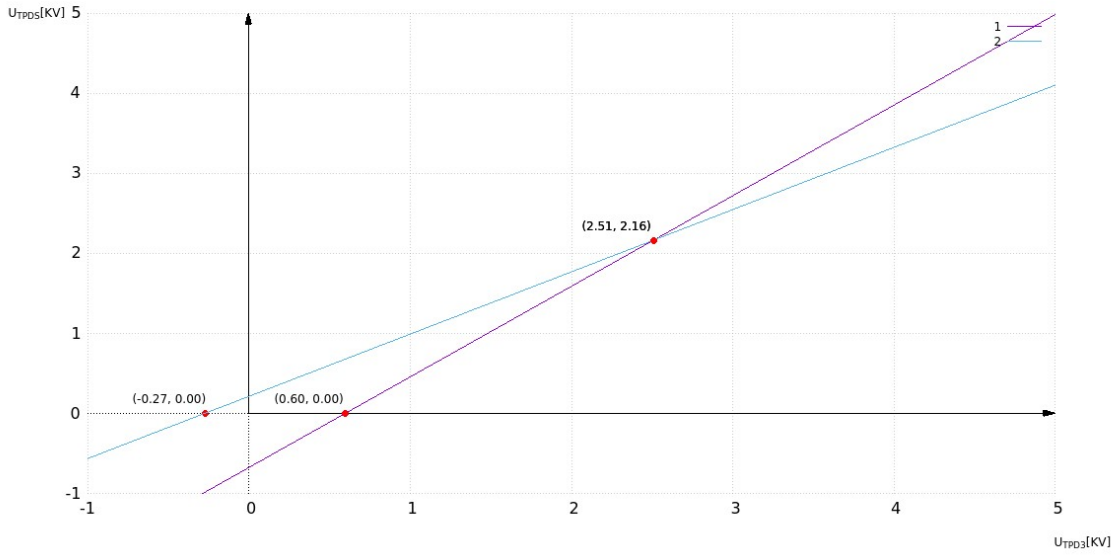
<sup>6</sup> Podela ordinate i apcise su izabrane da presek regresionih pravih bude približno u centru ordinantno-apcise ravni za jednačine regresionih pravih datih u potpisu slika i određenih na osnovu eksperimentalnih rezultata i izraza 3.12 i 3.14



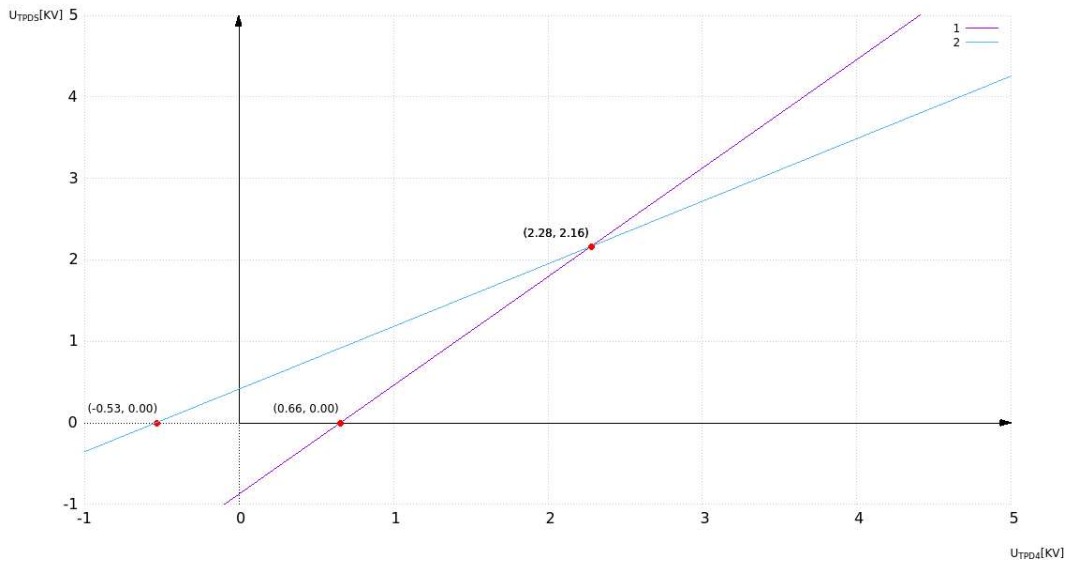
a)



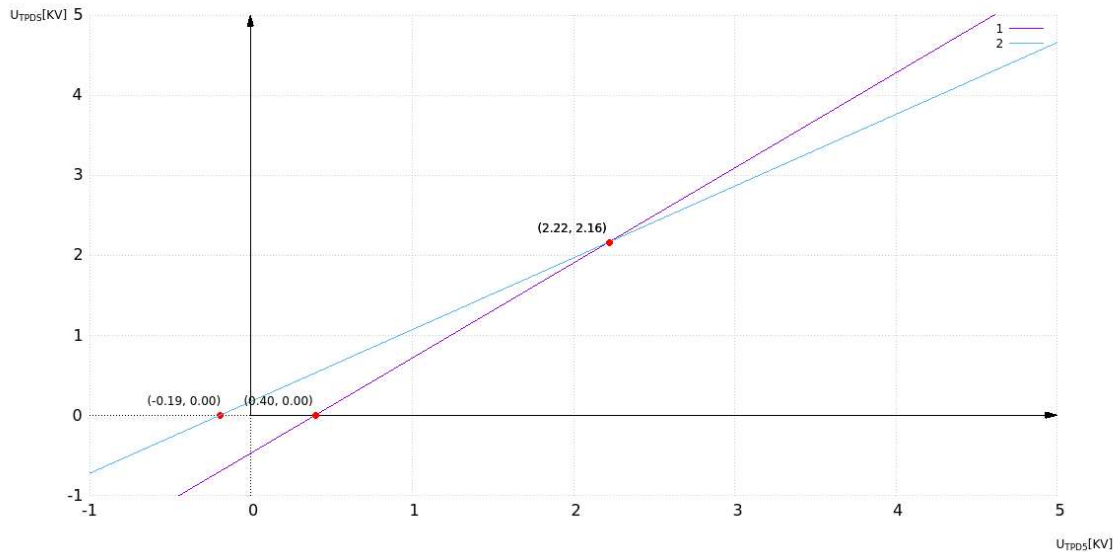
b)



c)



d)



e)

Slika 5.8 - Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih praga parcijalnih pražnjenja dobijenih za parove statističkih uzoraka: a) ceo stator – jedna kanura ( $1 - U_{NPP1} = 0.82 U_{NPP1} + 0.03$ ;  $2 - U_{NPP1} = 0.94 U_{NPPS} + 0.63$ ); b) ceo stator – dve kanure ( $1 - U_{NPPS} = 0.88 U_{NPP2} + 0.12$ ;  $2 - U_{NPP2} = 0.94 U_{NPPS} + 0.56$ ); c) ceo stator – tri kanure ( $1 - U_{NPPS} = 0.97 U_{NPP3} + 0.27$ ;  $2 - U_{NPP3} = 0.88 U_{NPPS} + 0.60$ ); d) ceo stator – četiri kanure ( $1 - U_{NPPS} = 1.06 U_{NPP4} - 0.53$ ;  $2 - U_{NPP4} = 0.66 U_{NPPS} + 0.66$ ) i e) ceo stator – pet kanura ( $1 - U_{NPPS} = 1.07 U_{NPP5} - 0.19$ ;  $2 - U_{NPP5} = 0.83 U_{NPPS} + 0.40$ )

Dobijeni rezultati prikazani u tabeli 5.2 i na slici 5.8 potvrđuju da postoji snažna korelacija između rezultata ispitivanja praga parcijalnog pražnjenja na jednoj kanuri ili više kanura i na celom statoru obrtne mašine iz kog su te kanure uzete. To znači da je moguće ispitivanjem jedne kanure uzete iz statora, na prag parcijalnog pražnjenja (i parametre izolacije povezane sa parcijalnim pražnjenjem) doći do zaključka o odgovarajućem ponašanju celog statora. Naravno da bi se došlo do kvantitativnih rezultata vezanih za parcijalno pražnjenje statora obrtne mašine potrebno je rezultate dobijene eksperimentima sa jednom kanurom korigovati primenom zakona porasta verovatnoće.

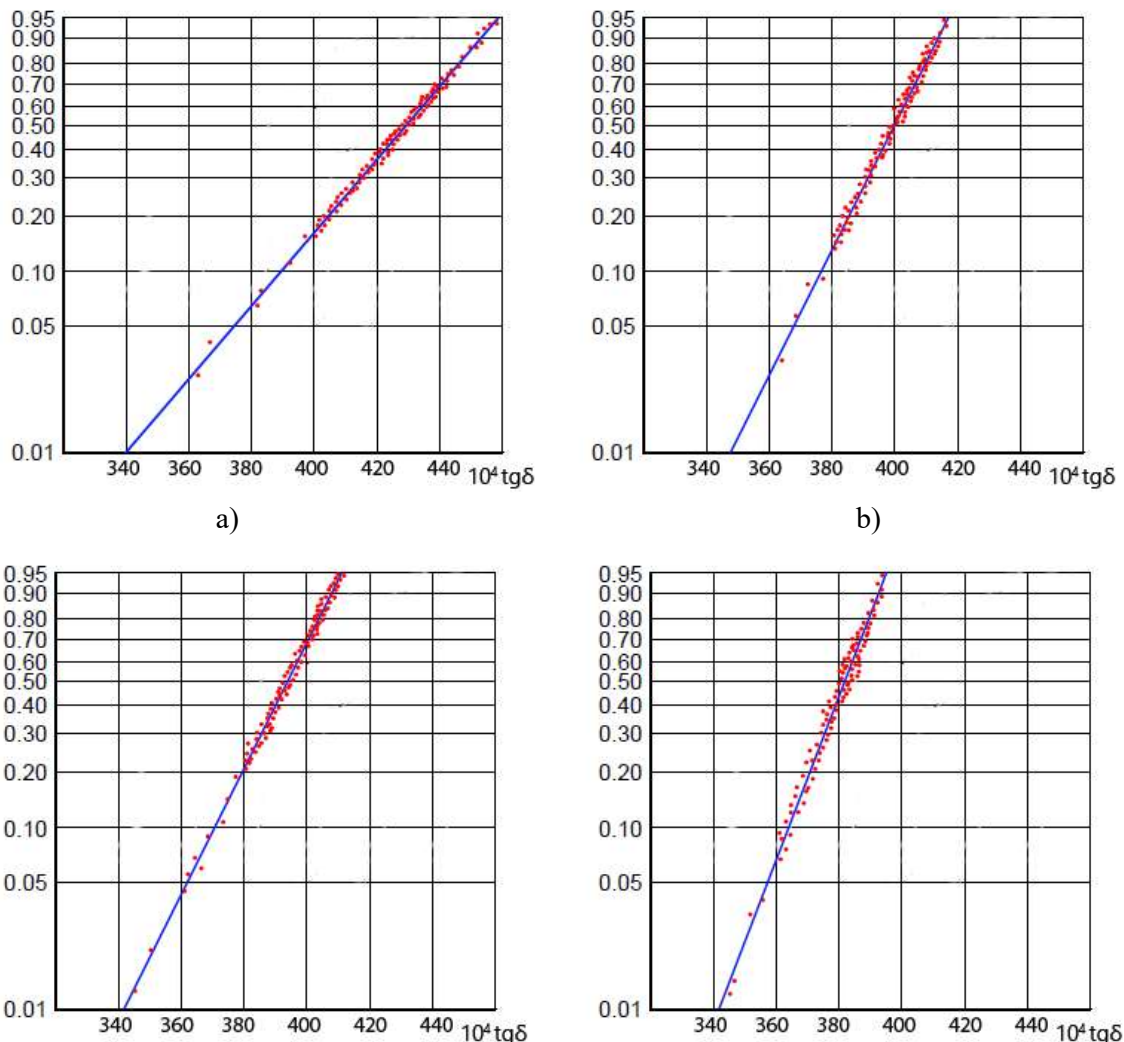
### 5.1.2. Rezultati i diskusija o primenljivosti ispitivanja slučajne promenljive tangens ugla gubitaka na predikciju stanja izolacionog sistema statora

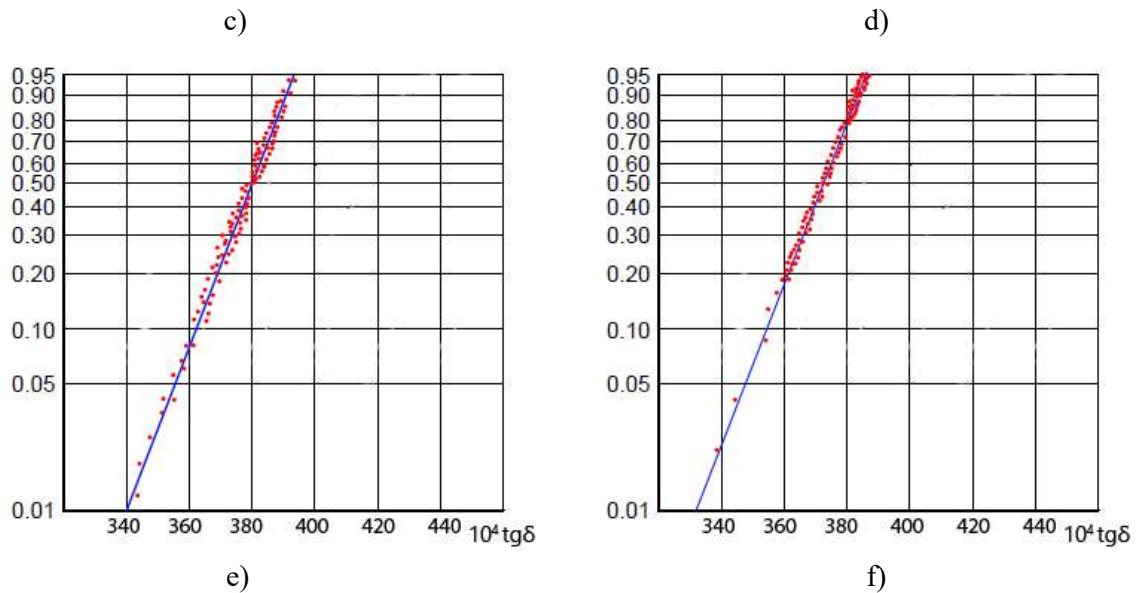
U prethodnom potpoglavlju je starenje izolacije do granice utroška njenog kompletnog životnog veka posmatrano preko porasta učestalosti i intenziteta parcijalnog pražnjenja do okončanja životnog veka probojem izolacije i gubitkom njene mogućnosti razdvajanja potencijala, tj. gubitka njenog osnovnog izolacionog svojstva. Međutim mera starenja izolacije je i tangens ugla gubitaka. Tangens ugla gubitaka je na prvi pogled ravnopravna kontinualna mera gubitka osnovnog izolacionog svojstva (sa nekog aspekta i efikasniji u ac režimu rada), pošto u trenutku kada postane beskrajno veliki, struja i napon se nađu u fazi što takođe znači da je posmatrana izolacija izgubila svoje osnovno izolaciono svojstvo. Posmatrajući starenje izolatora preko parcijalnog pražnjenja i tangens ugla gubitaka, na taj način se čini ekvivalentnim. Međutim tu se zaboravljaju dva aspekta. Prvi aspekt je da se parcijalno pražnjenje i proboj izolacije mogu javiti kod svih oblika naponskog opterećenja, a drugi da je tangens ugla gubitaka vezan uglavnom za razne oblike *ac* napona. I sa matematičke tačke

gledanja postoji bitna razlika, naime nulta vrednost dielektrične čvrstoće znači da taj materijal nije izolator, a jako velika vrednost tangens ugla gubitaka koja teži beskonačnosti ne znači da je materijal koji je ispoljava prestao biti izolator već samo teži tome (tj. da se nalazi u procesu gubitka izolacionih svojstava). Bez obzira na to interesantno je ispitati da li se preko određivanja tangens ugla gubitaka može odrediti životni vek izolacije statora obrtne mašine. Pošto sve prethodno rečeno o logici izbora jedne komponente koja može karakterisati stanje izolacije celine ponašanjem jedne neke vitalne komponente i ovde se, sa istim argumentima, odlučilo da se merenjem tangens ugla jedne kanure zaključi o ostatku životnog veka izolacije statora obrtne mašine.

Ekperimentalni postupak kojim su dobijeni rezultati u ovom potpoglavlju opisani su u poglavlju 4. Statistička metoda obrade dobijenih rezultata opisani su u poglavlju 3. Svi eksperimenti su vršeni na obrtnim električnim mašinama proizvođača Sever-Subotica istog tipa. Iz istih tipova mašina su uzimane korišćene i nove kanure. Vreme provedeno korišćenih kanura u pogonu bilo je poznato.

Na slici 5.9 prikazane su statističke raspodele slučajne promenljive tangens ugla gubitaka dobijene eksperimentalno na troparametarskom Vejbulovom papiru verovatnoće za stator obrtne mašine nakon pet godina u pogonu i za 1, 2, 3, 4 i 5 kanura (svedenih na jednu kanuru primenom zakona porasta verovatnoće) uzetih iz istog statora obrtne mašine pri čemu su u upražnjenim mestima statora zamenjene drugim. Kanure uzete iz statora obrtne mašine postavljene su u stege kao na slici 4.4.

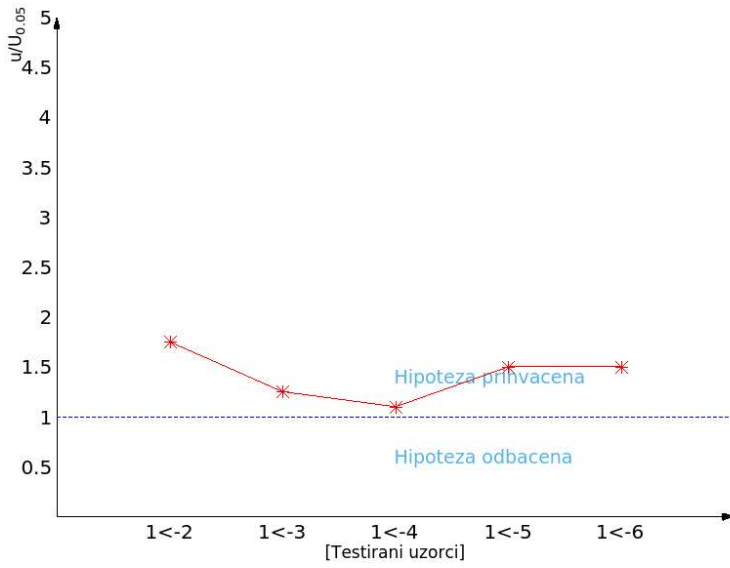




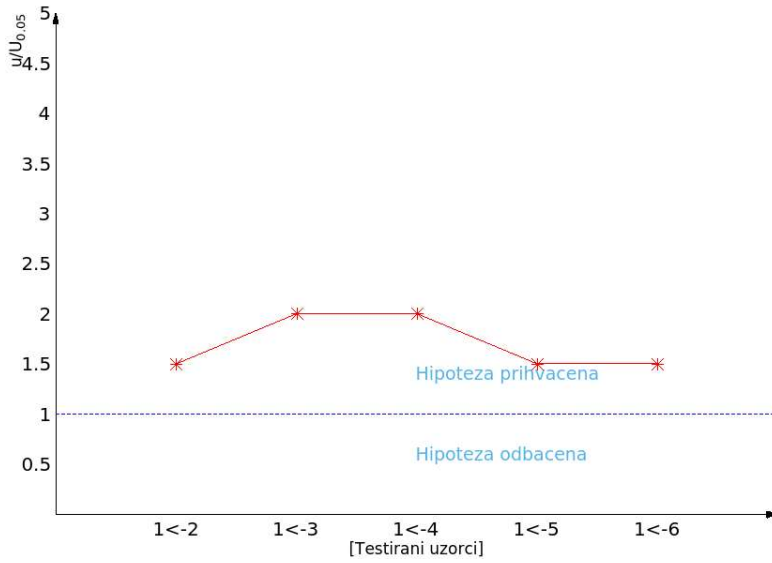
Slika 5.9 – Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijene eksperimentalno na papiru troparametarske Vejbulove verovatnoće: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.

Rezultati prikazani na slici 5.9 potvrđuju prethodno iskazano očekivanje da slučajne veličine tangens ugla gubitaka pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. Takav rezultat je potvrđen i primenom  $\chi^2$ -testa i testom Kolmogorova sa statističkim nesigurnostima 3 % i 3.5 %. Ovi testovi su vršeni sa komercijalnim programom koji je na osnovu unešenih slučajnih promenljivih i raspodela koja se pretpostavlja, davao, između ostalog, i podatak o statističkoj nesigurnosti. Ove vrednosti statističkih nesigurnosti su u potpunosti zadovoljavajuće pa se može tvrditi da slučajne promenljive tangens ugla gubitaka za sve posmatrane statističke uzorke pripadaju jedinstvenim troparametarskim Vejbulovim raspodelama. To naravno potvrđuju i prave kumulativne verovatnoće prikazane na slici 5.9, ali potpuna potvrda se dobila primenom U-testa (kao i u prethodnom paragrafu za slučaj parcijalnog pražnjenja). U tu svrhu su svi statistički uzorci od po 100 vrednosti slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijenih eksperimentalno i prikazani na slici 5.9 podeljeni na po 5 hronoloških poduzoraka od po 20 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka i na njih je primenjen U-test statističke nesigurnosti 5 %. Dobijeno je pet poduzoraka i vršeno je testiranje 2, 3, 4 i 5 poduzoraka u odnosu na poduzorak 1. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 5.10 (uz istu primedbu da je broj testiranih slučajnih veličina bio veći od 100).

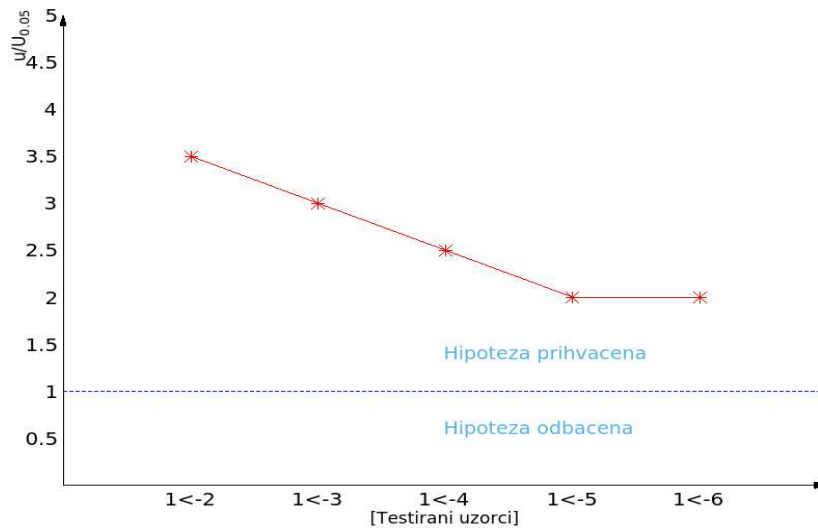




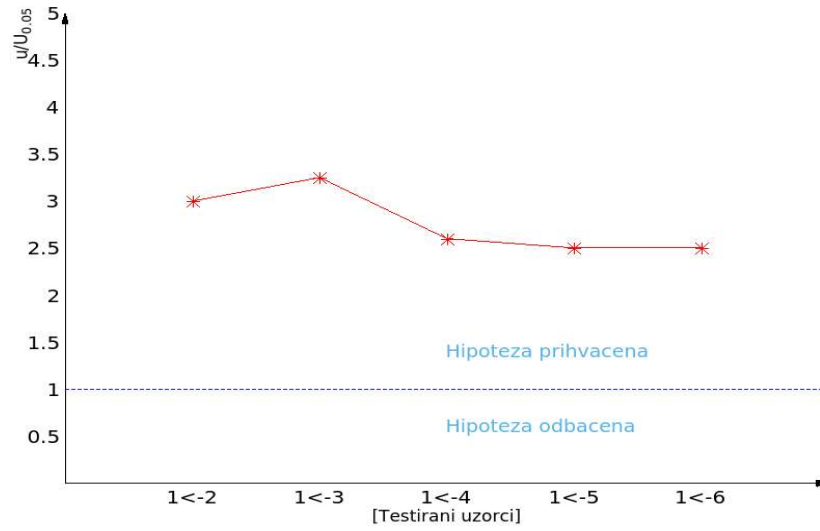
a)



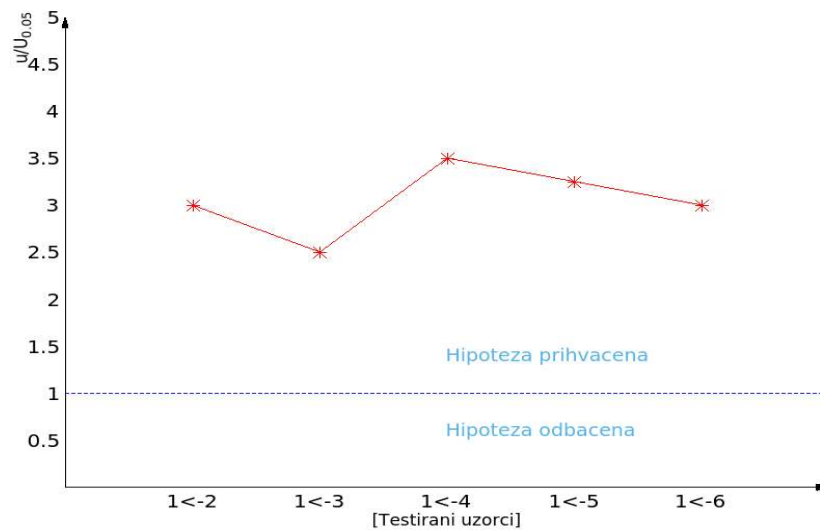
b)



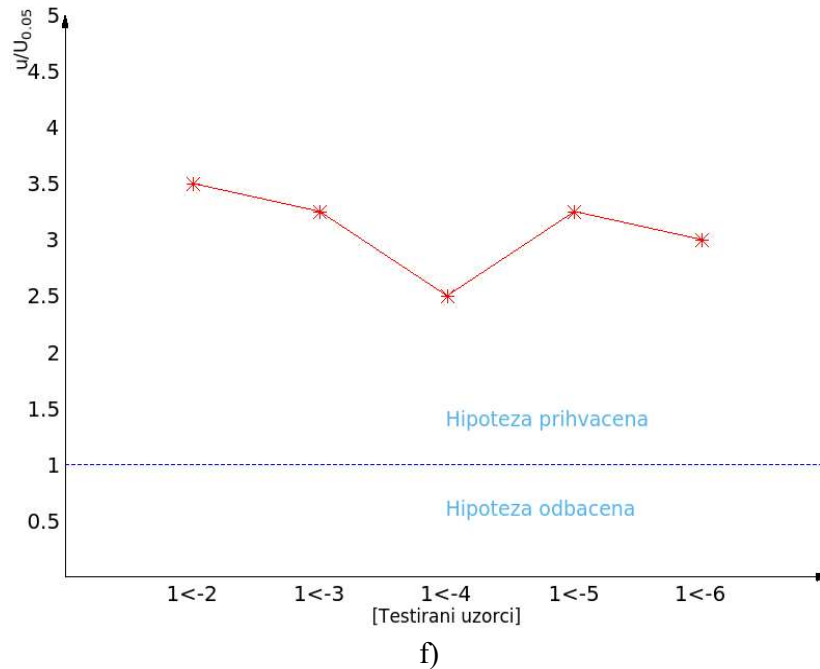
c)



d)



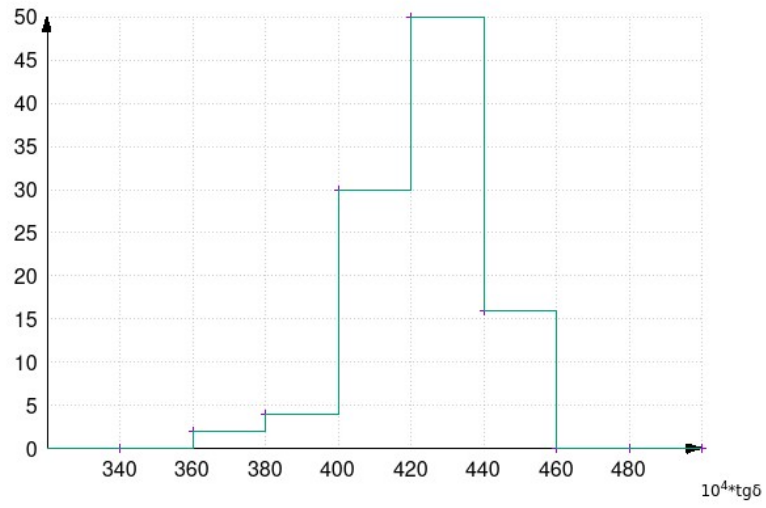
e)



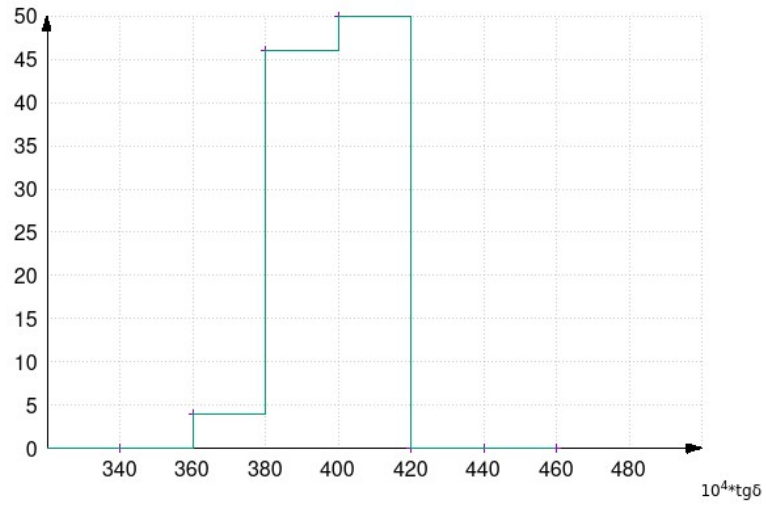
Slika 5.10 - Rezultati U-testa (količnik statistike testa sa kritičnom vrednosti testa mere 0.05 za sve rangove testa), primenjenog na hronološke poduzorke od 20 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka za sve statističke uzorke od po 100 vrednosti slučajne promenljive tangens ugla gubitaka: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.

Rezultati U-testa prikazani na slici 5.10 potvrđuju rezultate prikazane na slici 5.9, tj. da sve slučajne promenljive tangens ugla gubitaka statističkih uzoraka dobijenih eksperimentalno za ceo stator obrtne mašine kao i za 1, 2, 3, 4, 5 kanura i celu izolaciju statora obrtne mašine (svedene zakonom porasta verovatnoće na jednu kanuru), pripadaju jedinstvenom statističkom uzorku (nezavisno od statističke raspodele, pošto U-test važi za proizvoljnu statističku raspodelu). Ovde se dobijeni rezultati razlikuju od rezultata dobijenih pod istim eksperimentalnim uslovima za slučajnu promenljivu praga parcijalnog pražnjenja prikazani na slici 5.1 (kada su statističke raspodele eksperimentalno dobijenih slučajnih promenljivih bile složene raspodele aditivnog tipa).

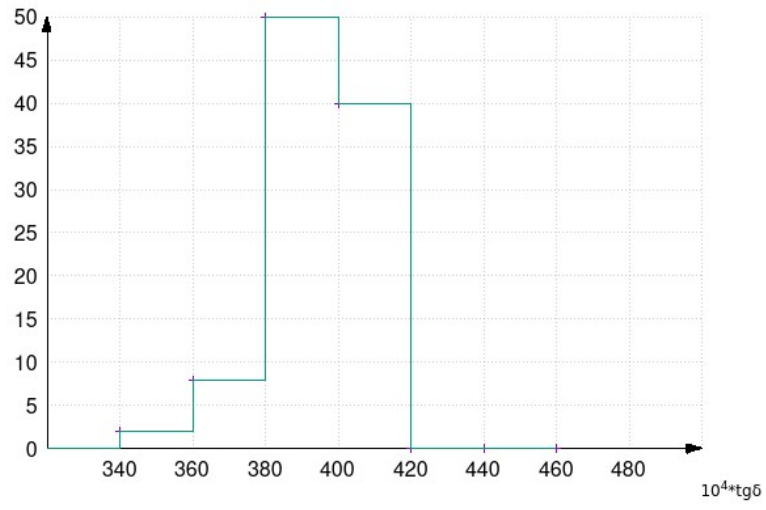
Uzrok ove razlike je u različitoj prirodi posmatranih slučajnih promenljivih. Naime, slučajna promenljiva praga parcijalnog pražnjenja je diskretna slučajna promenljiva, a slučajna promenljiva tangens ugla gubitaka je kontinualna slučajna promenljiva koja je u svojoj osnovi aditivna, pa ne može to isto da se izrazi u rezultatnoj raspodeli, tj. ne može da se diskretizuje. Ovu tvrdnju potvrđuju i histogrami klase  $0.5(1+3.3\log n)$  slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka za sve eksperimentalno dobijene statističke uzorke, slika 5.11.



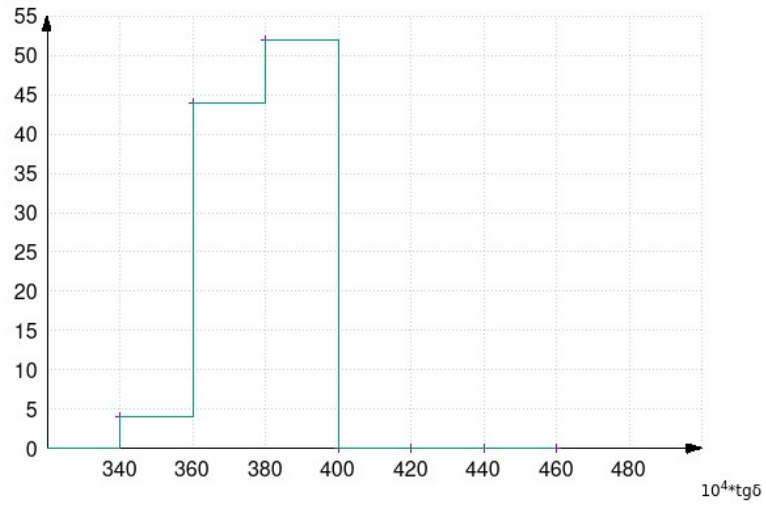
a)



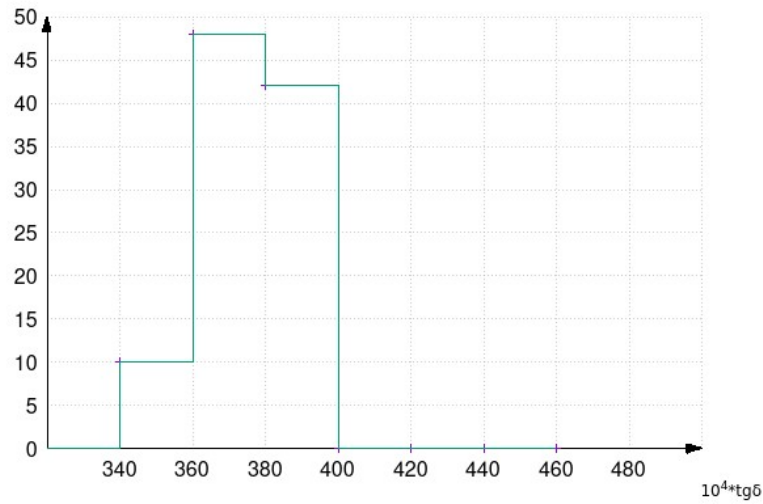
b)



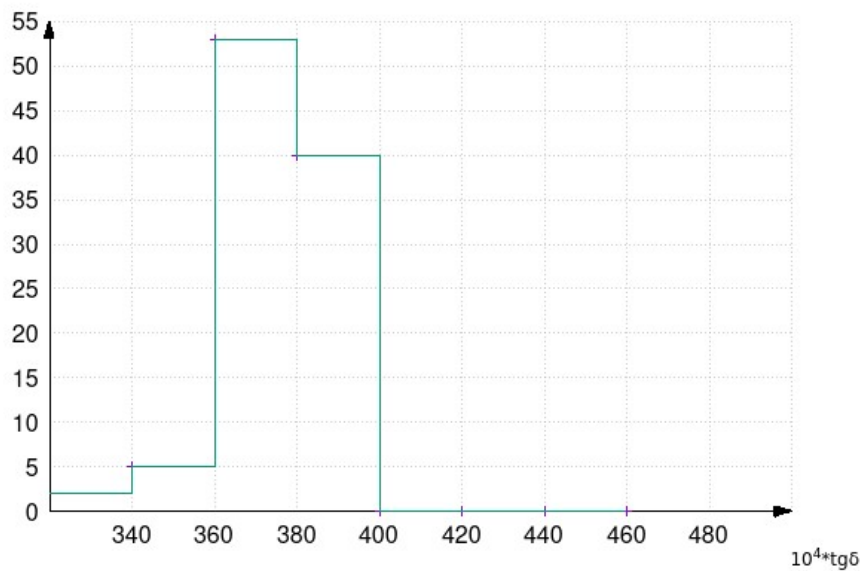
c)



d)



e)



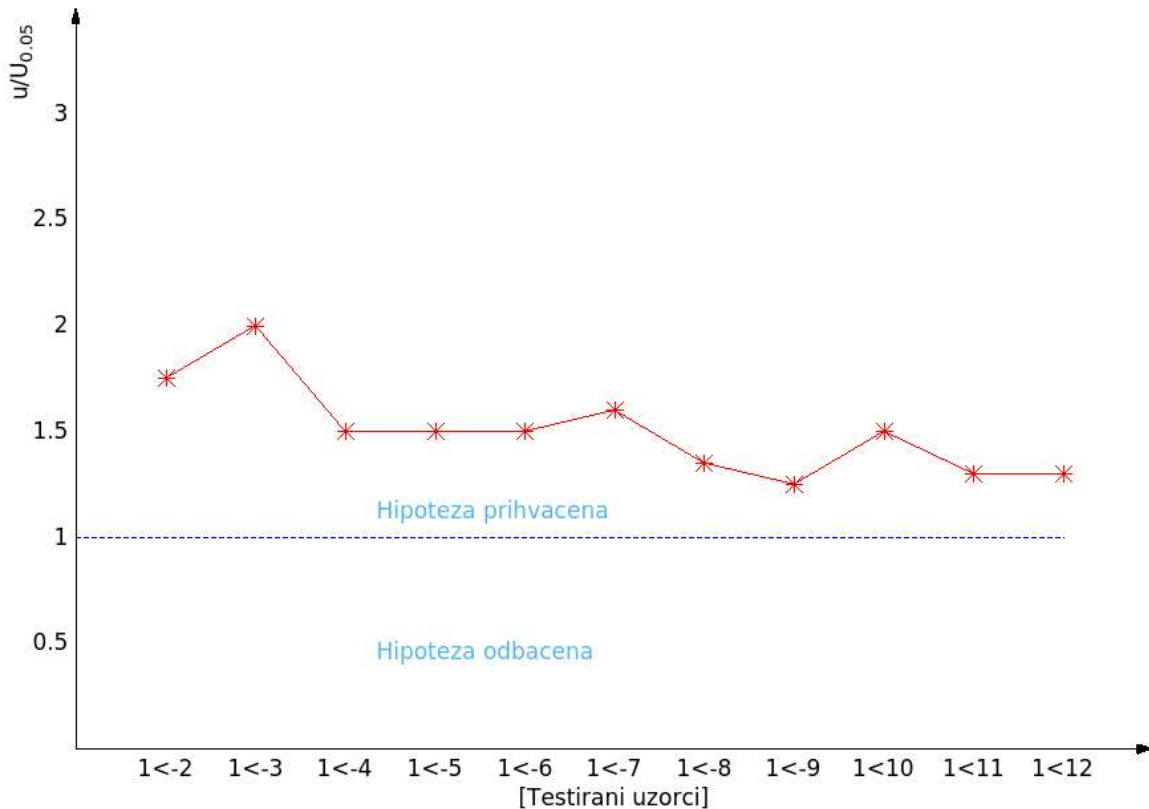
f)

Slika 5.11 - Histogrami slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijene eksperimentalno za sve statističke uzorke na bazi statističkog uzorka od 100 slučajnih veličina: a) za 1 kanuru; b) za 2 kanure; c) za 3 kanure; d) za 4 kanure; e) za 5 kanura i f) za ceo stator.

Histogrami slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijeni eksperimentalno potvrđuju pretpostavku da sve slučajne promenljive tangens ugla gubitaka na svim ispitivanim uzorcima pripadaju jedinstvenim troparametrskim Vejbulovim raspodelama.

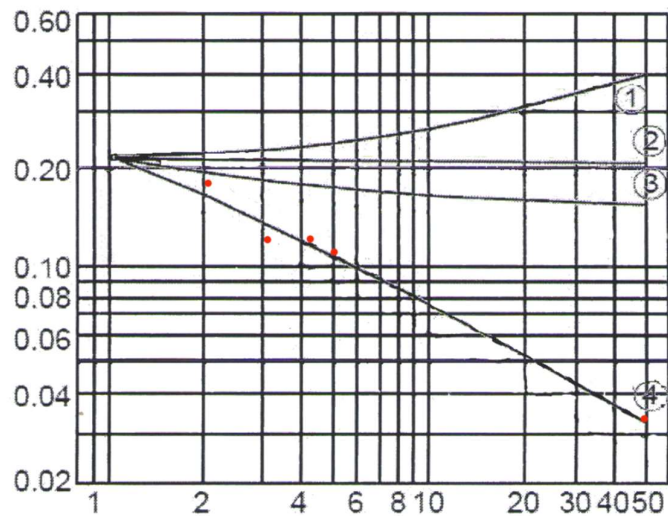
Da bi se utvrdilo da li svi statistički uzorci slučajne promenljive tangens ugla gubitaka pripadaju jedinstvenom statističkom uzorku izvršena je korekcija svih slučajnih veličina za sve

statističke uzorke dobijene eksperimentima sa jednom, dve, tri, četiri i pet kanura u odnosu na stator obrtne mašine primenom zakona porasta verovatnoće primenom izraza 3.40 i 3.41 (opravdanost koja će biti naknadno proveravana da li svi uzorci pripadaju Vejbulovoj raspodeli). Na taj način je dobijen zbirni i jedinstven statistički uzorak od 600 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka (od kojih je 500 korigovano zakonom porasta verovatnoće). Tako formiran jedinstven statistički uzorak od 600 realizacija slučajnih promenljivih je podeljen na 12 hronoloških statističkih uzoraka od 50 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka. Ovaj skup od 12 hronoloških statističkih poduzoraka testiran je primenom U-testa na pripadnost jedinstvenom statističkom uzorku sa statističkom nesigurnosti od 5 %, slika 5.12.



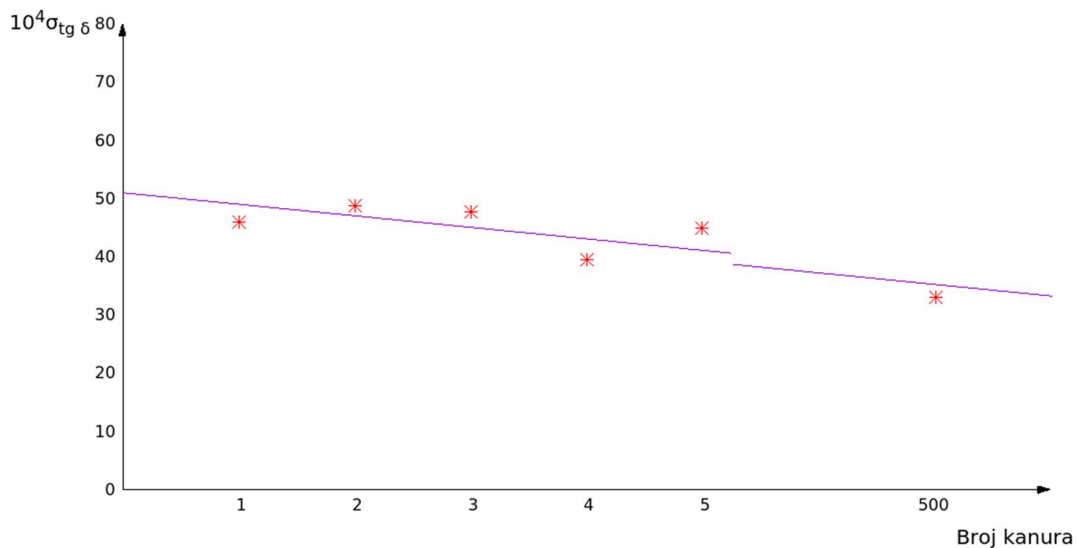
Slika 5.12 - Rezultati U-testa statističke nesigurnosti 5 % na hronološkim statističkim poduzorcima sa po 50 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka eksperimentalno dobijenih i svedenih na odgovarajuće slučajne promenljive statora u celini primenom zakona porasta verovatnoće

Prilikom formiranja jedinstvenog statističkog uzorka od 600 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijenih eksperimentalno izvršena je korekcija zakonom porasta verovatnoće slučajnih promenljivih dobijenih sa jednom, odnosno sa 2, 3, 4 i 5 kanura. Tom prilikom je napomenuto da će se opravdanost ovakvog postupka proveriti utvrđivanjem da li povećani uzorci pripadaju Vejbulovoj raspodeli. Ta provera je, kao i u analognom slučaju ispitivanja važenja zakona porasta verovatnoće za slučajnu promenljivu prag parcijalnog pražnjenja, izvršena određivanjem odnosa eksperimentalno dobijenih zavisnosti koeficijenata varijacije statističkih uzoraka tangens ugla gubitaka za 1, 2, 3, 4, 5 kanura i ceo stator (50 kanura) obrtne mašine i teorijski očekivane zavisnosti prema tabeli 3.2, zajedno sa odgovarajućim teorijskim krivama za duplo-eksponencijalnu raspodelu, dvoparametarsku Vejbulovu raspodelu, normalnu raspodelu i troparametarsku Vejbulovu raspodelu, slika 5.13.



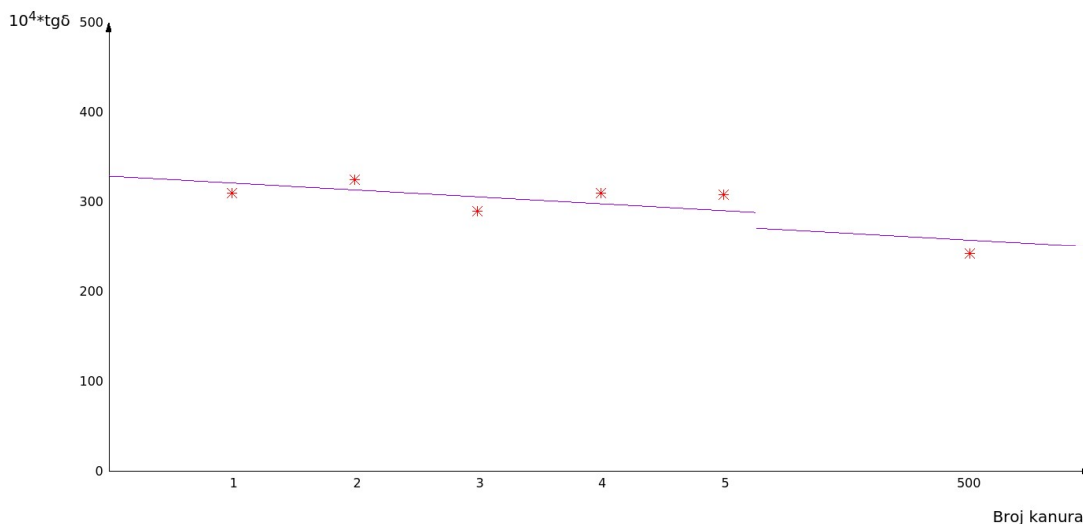
Slika 5.13 - Zavisnost koeficijenta varijacije statističkih uzoraka slučajne promenljive tangens ugla gubitaka od faktora uvećanja n (broja kanura) zajedno sa odgovarajućim teorijskim zavisnostima za: 1) duplo-eksponencijalnu raspodelu; 2) normalnu raspodelu; 3) dvoparametarsku Weibulovu raspodelu; 4) troparametarsku Weibulovu raspodelu

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.13 može se sa sigurnošću tvrditi da za slučajnu promenljivu tangens ugla gubitaka u statoru obrtne mašine važi zakon porasta verovatnoće koji je prethodno primenjen, a opravdanost toga u statističkom pogledu se ovime potvrđuje. Da bi se ovaj zakon potvrdio i kvantitativno, postupljeno je isto kao prilikom provere važenja zakona porasta verovatnoće na slučajnu promenljivu praga parcijalnog pražnjenja, slika 5.14.



a)





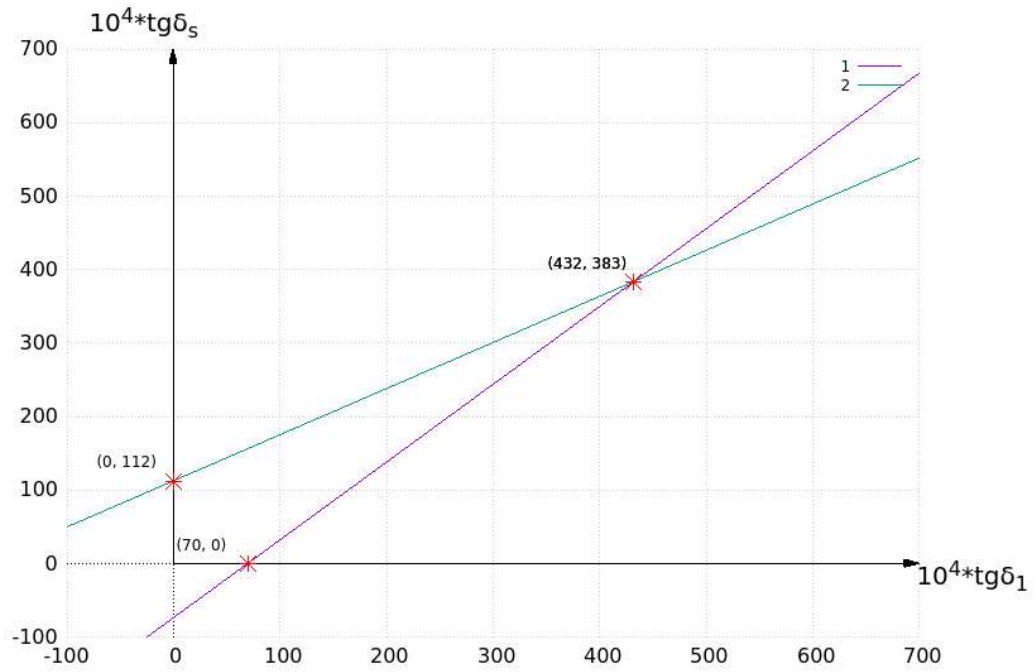
b)

Slika 5.14 - Zavisnost standardnog odstupanja i srednje vrednosti od faktora porasta: a) zavisnost standardnog odstupanja stohastičkih uzoraka slučajne promenljive tangens ugla gubitaka od faktora povećanja zajedno sa eksperimentalno dobijenim vrednostima; b) zavisnost srednje vrednosti statističkih uzoraka slučajne promenljive tangens ugla gubitaka zajedno sa tačkama.

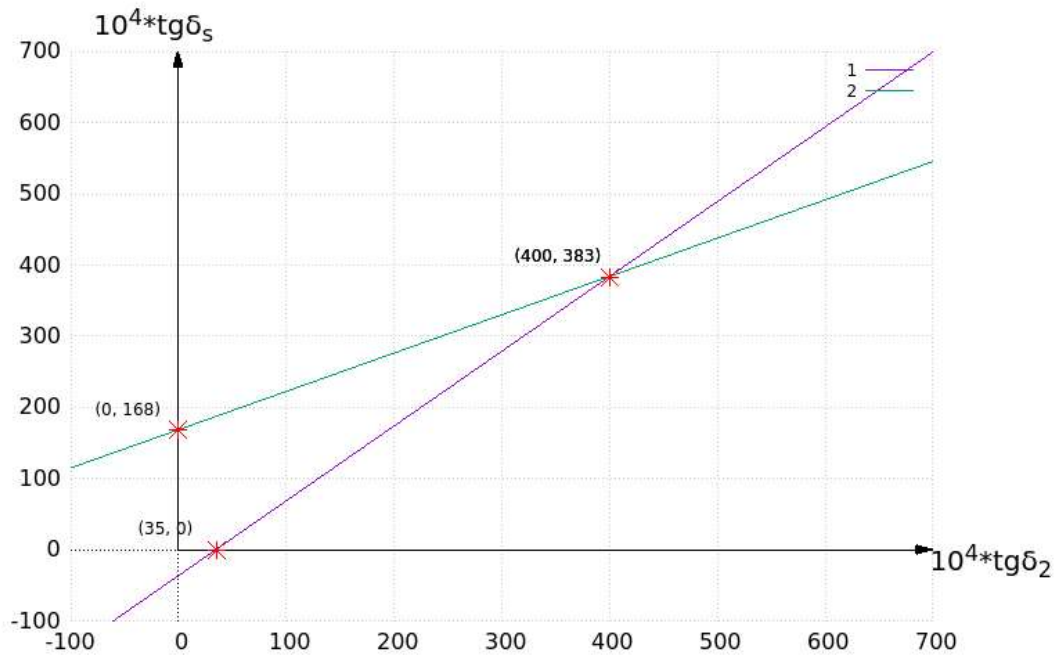
To što zakon porasta verovatnoće važi za statističke uzorke slučajne promenljive tangens ugla gubitaka još uvek ne znači da eksperimentalnim određivanjem statističkog uzorka slučajne promenljive tangens ugla gubitaka za jednu ili više kanura pod uslovima koji odgovaraju uslovima u statoru obrtne mašine, može da se dođe do validnog zaključka o ponašanju statističkog uzorka iste slučajne promenljive za ceo stator. To se može utvrditi i dobijeni zaključak kvantifikovati, jedino određivanjem koeficijenta korelacije između posmatranih statističkih uzoraka i crtanjem odgovarajućih regresionih pravih. U tabeli 5.3 su date vrednosti koeficijenta korelacije zajedno sa intervalima poverenja parova statističkih uzoraka od 100 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka: a) jedna kanura-ceo stator; b) dve kanure-ceo stator; c) tri kanure-ceo stator; d) četiri kanure-ceo stator i e) pet kanura-ceo stator. Na slici 5.15 date su odgovarajuće regresione prave. Koeficijenti korelacije su izračunati na osnovu izraza 3.17.

**Tabela 5.3: Koeficijent korelacije zajedno sa intervalima poverenja parova statističkih uzoraka od 100 slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka**

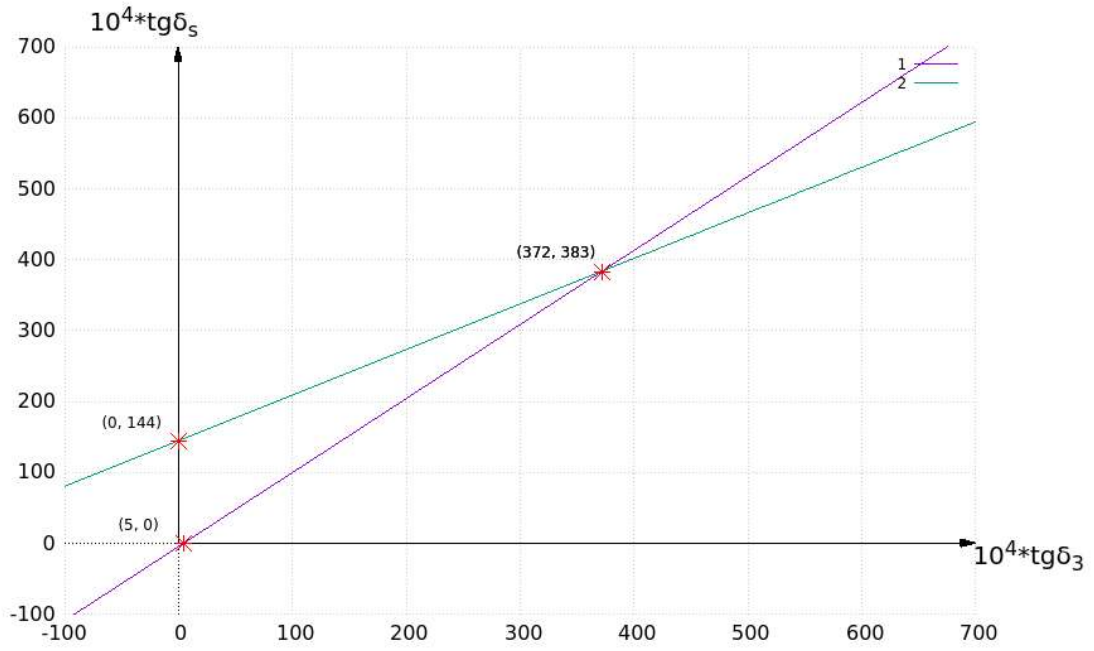
	Koeficijent korelacije	Intervali poverenja
<b>jedna kanura-ceo stator</b>	0.91	0.801 – 0.91
<b>dve kanure-ceo stator</b>	0.92	0.74 – 0.82
<b>tri kanure-ceo stator</b>	0.94	0.80 – 0.87
<b>četiri kanure-ceo stator</b>	0.95	0.71 – 0.83
<b>pet kanura-ceo stator</b>	0.95	0.69 – 0.79



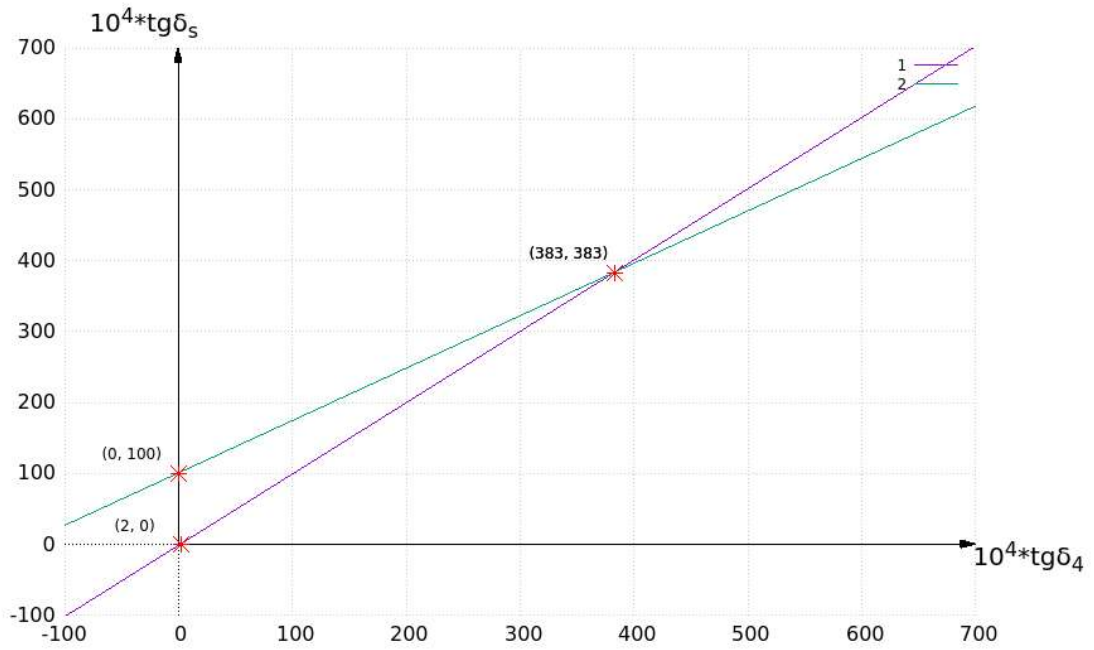
a)



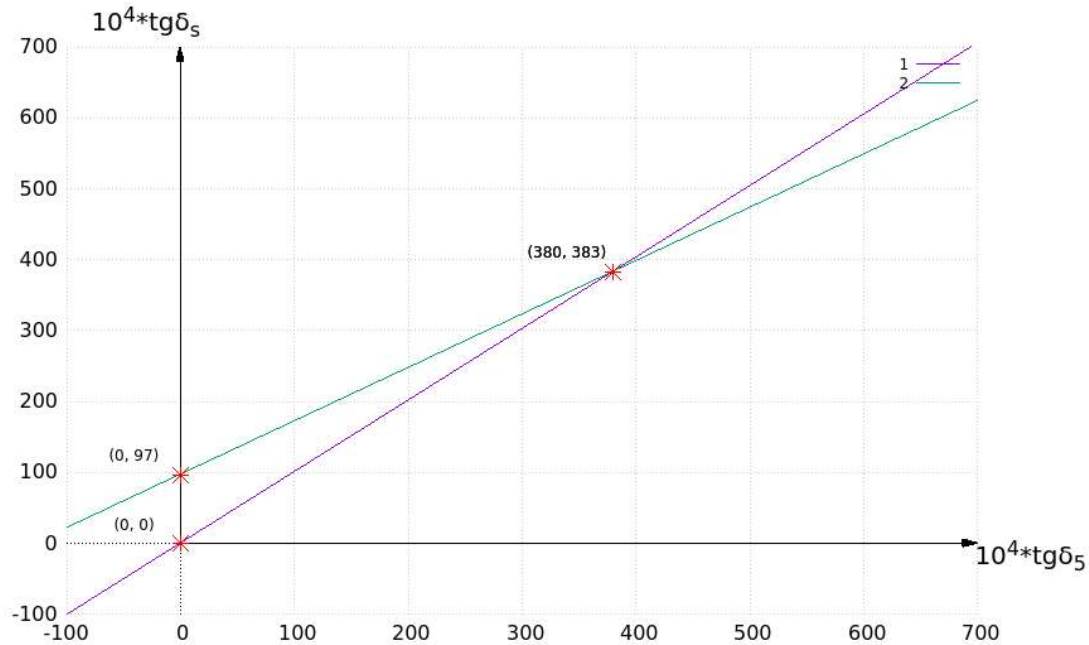
b)



c)



d)

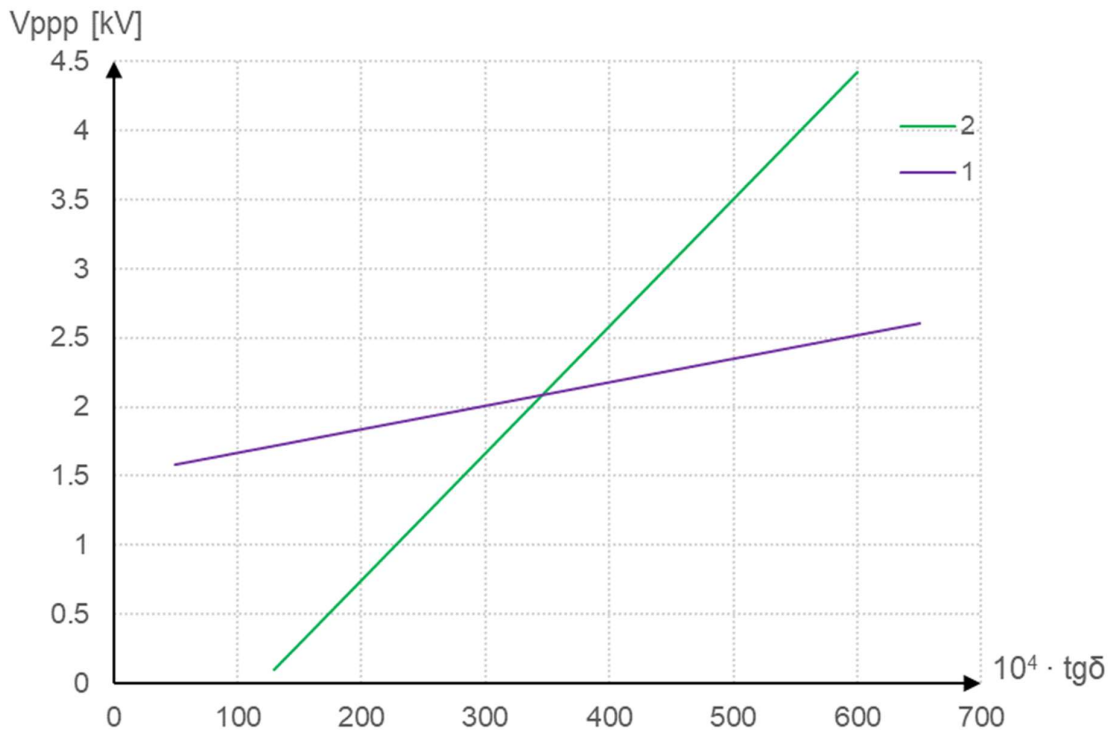


e)

Slika 5.15 - Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka dobijenih za parove statističkih uzoraka: a) ceo stator – jedna kanura ( $1 - 10^4 * tg \delta_s = 1.06 10^4 * tg \delta_1 - 74.06$ ;  $2 - 10^4 * tg \delta_1 = 1.59 10^4 * tg \delta_s - 178.54$ ); b) ceo stator – dve kanure ( $1 - 10^4 * tg \delta_s = 1.05 10^4 * tg \delta_2 - 36.73$ ;  $2 - 10^4 * tg \delta_2 = 1.86 10^4 * tg \delta_s - 312.56$ ); c) ceo stator – tri kanure ( $1 - 10^4 * tg \delta_s = 1.04 10^4 * tg \delta_3 - 5.22$ ;  $2 - 10^4 * tg \delta_3 = 1.56 10^4 * tg \delta_s - 224.13$ ); d) ceo stator – četiri kanure ( $1 - 10^4 * tg \delta_s = 1.01 10^4 * tg \delta_4 - 2.01$ ;  $2 - 10^4 * tg \delta_4 = 1.35 10^4 * tg \delta_s - 135.34$ ) i e) ceo stator – pet kanura ( $1 - 10^4 * tg \delta_s = 1.01 10^4 * tg \delta_5$ ;  $2 - 10^4 * tg \delta_5 = 1.33 10^4 * tg \delta_s - 128.89$ )

Dobijene vrednosti koeficijenta korelacije date u tabeli 5.3 i regresione prave prikazane na slici 5.15 potvrđuju izuzetno snažnu korelaciju između slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka za 1, 2, 3, 4 i 5 kanura uzetih iz statora obrtne mašine (i zamenjenim odgovarajućim kanurama) sa slučajnim promenljivim celog statora. Uočene vrednosti korelacije i regresije su izraženije od istih vrednosti dobijenih analognim ispitivanjem za slučajnu promenljivu praga parcijalnog pražnjenja, a i porast koeficijenta korelacije sa povećanjem broja kanura u kontrolnom uzorku je daleko manje izražen. Razlog ovih efekata je u prirodi same veličine tangens ugla gubitaka koja ima karakteristike kontinualne veličine.

Na osnovu prethodno prikazanih rezultata pripadnosti slučajne promenljive tangens ugla gubitaka za 1,2,3,4 i 5 kanura i za celu izolaciju statora obrtne mašine može se zaključiti da merenjem tangensa ugla gubitaka jedne kanure može lako (primenom zakona porasta verovatnoće) da se odredi tangens ugla gubitaka izolacije celog statora. Da bi se utvrdilo da li na osnovu merenja tangensa ugla gubitaka može da se proceni ostatak životnog veka obrtne mašine potrebno je proveriti da li postoji korelacija između slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka i praga parcijalnog pražnjenja. Razlog za to je činjenica da slučajna promenljiva praga parcijalnog pražnjenja ima linearnu korelaciju sa slučajnom promenljivom probojni napon (čija pojava označava kraj izolacionih svojstava odnosno kraj životnog veka izolacije). Na slici 5.16 su date regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka i praga parcijalnih pražnjenja.



Slika 5.16 - Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih tangens ugla gubitaka i prag parcijalnog pražnjenja za jednu kanuru koja je provela u pogonu 10 godina  
 (1 -  $V_{\text{ppp}} = 0.0017 \cdot 10^4 \text{ tg}\delta + 1.5$ ; 2 -  $V_{\text{ppp}} = 0.0092 \cdot 10^4 \text{ tg}\delta - 1.1$ ).

Međutim, prikazane regresione prave za par statističkih uzoraka slučajnih promenljivih praga parcijalnog pražnjenja i tangens ugla gubitaka za jednu kanuru, slika 5.16, zajedno sa izraženim koeficijentom korelacije 0.27, izračunatim na osnovu izraza 3.17 sa odgovarajućim intervalom povećanja, pokazuju da je korelacija između takvog para slučajnih veličina slaba i teško može poslužiti slučajnoj promenljivoj tangens ugla gubitaka kao meri krive životnog veka. Takav rezultat je posledica različite prirode posmatranih slučajnih veličina (kanura koja je doživela proboj, ako izolator nije organskog porekla, može i dalje imati prihvatljivu vrednost slučajne promenljive tangens ugla gubitaka). U tom smislu se slučajna veličina tangens ugla gubitaka, mada služi za procenu kvaliteta izolacije statora obrtne mašine, ne može primeniti za formiranje algoritma koji bi omogućio procenu komplementarnih veličina: utrošak životnog veka i ostatak životnog veka sa pripadajućim kvantilom verovatnoće.

Iz tog razloga će se u daljem razmatranju obratiti pažnja na slučajne promenljive prag parcijalnog pražnjenja i probojni napon između kojih postoji linearna zavisnost. Pri čemu treba naglasiti da ovo isključenje tangens ugla gubitaka kao indikatora ostatka životnog veka on svakakako može da bude veoma koristan pri proceni starosti izolacije, i to u nekim slučajevima nezamenljiv.

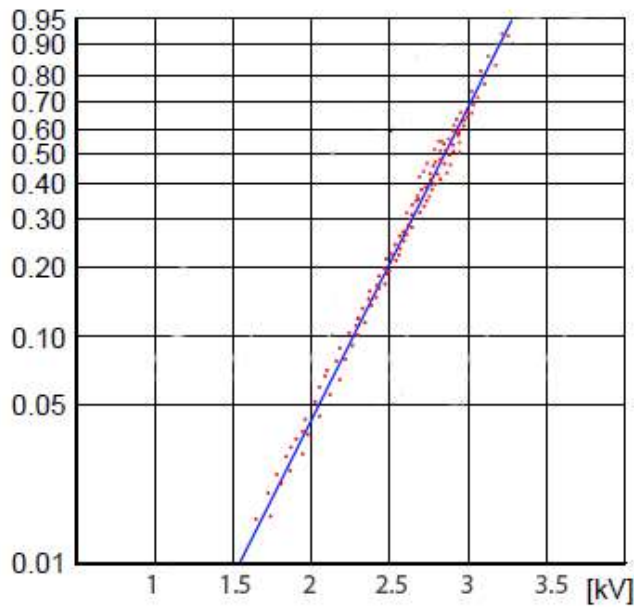
### 5.1.3. Rezultati i diskusije o primenljivosti ispitivanja slučajne promenljive prag parcijalnog pražnjenja na uzorcima sa kanura na predikciju stanja izolacionog sistema statora

Svakako je ubrzanje diagnostike ostatka životnog veka kada se na mesto izolacije statističkog skupa dovoljnog broja celih statora obrtne mašine vrše ispitivanja istog tolikog broja kanura uzetih iz tih mašina. Da je to ubrzanje procesa van svake sumnje, ali time proces dijagnostike

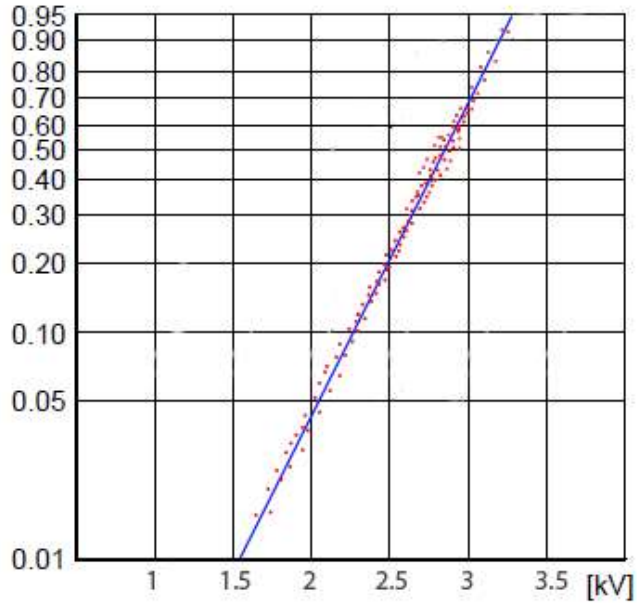
ostatka životnog veka ne postaje ni brz ni jednostavan. Naročito u slučajevima izuzetno gabaritnih obrtnih mašina kod kojih kanure izolacije statora mogu biti i preko 10 m visine (velike širine i težine). Iz tog se razloga pribegava, kao što je naglašeno, eksperimentisanju sa delom kanure koja u sebi nosi veliki procenat odgovornosti za dužinu životnog veka kanure, a time i izolacije celog statora obrtne mašine. Specifičan oblik kanure omogućava izdvajanje tri karakteristične zone, I, II i III slika 1.8, koje su tokom procesa tehnološke izrade i primene u pogonu trpele različita naprezanja koja su im manje ili više, favorizovali inicijaciju procesa koji uslovljavaju skraćenje ostatka životnog veka. Kako se životni vek izolacije okončava njenim probojem (destruktivnim fenomenom) čije je eksperimentalno određivanje manje pouzdano (usled teškoće obezbeđivanja dovoljnog broja identičnih uzoraka neophodnih za pouzdano statističko zaključivanje) i kako postoji linearna relacija između vrednosti praga parcijalnog pražnjenja (nedestruktivnim fenomenom) i vrednosti probojnog napona racionalno je ispitivanje izolacije delova kanure iz zona I, II i III vršiti merenjem parcijalnog pražnjenja, a konačne zaključke donositi na osnovu korelacija i digresija između slučajnih promenljivih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja i vrednosti probojnog napona.

Na slici 5.17 prikazane su kumulativne raspodele slučajne promenljive vrednosti praga parcijalnog pražnjenja, dobijene eksperimentalnim putem na troparametarskom Vejbulovom papiru verovatnoće za višeslojne i jednoslojne uzorke uzete sa pet godina korišćene kanure iz zona I, II i III postupkom opisanim u poglavlju 4. Na osnovu kumulativnih statističkih raspodela prikazanih na slici 5.17 može se tvrditi da slučajna promenljiva vrednost praga parcijalnog pražnjenja svih ispitivanih uzoraka pripada troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. Isti rezultat je dobijen i za uzorke uzete sa novih kanura (i tankoslojnih i debeloslojnih, i celih kanura). Po tome su i uzorci i kanure sa kojima je vršeno merenje proveli u pogonu 5 godina.

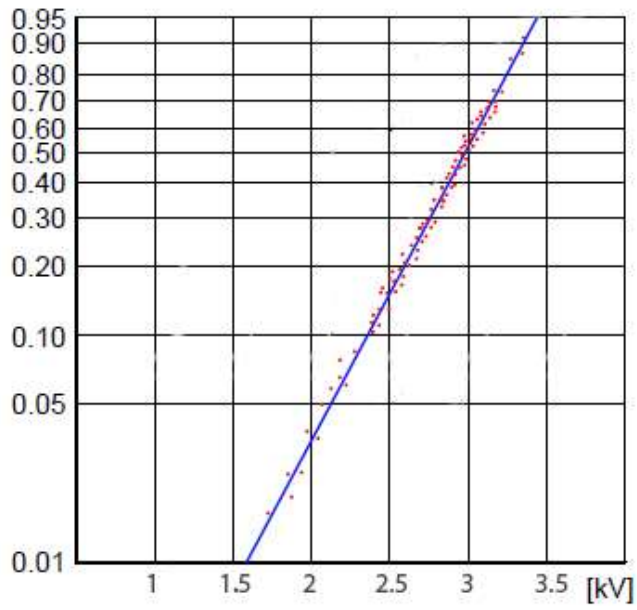
Sa kanura korišćenih 10, 15 i 20 godina, rezultati dobijeni grafičkim postupkom prikazani su na slici 5.17 potvrđeni su  $\chi^2$  – testom i testom Kolmogorova sa statističkom nesigurnosti 1 % i 1,5 %.



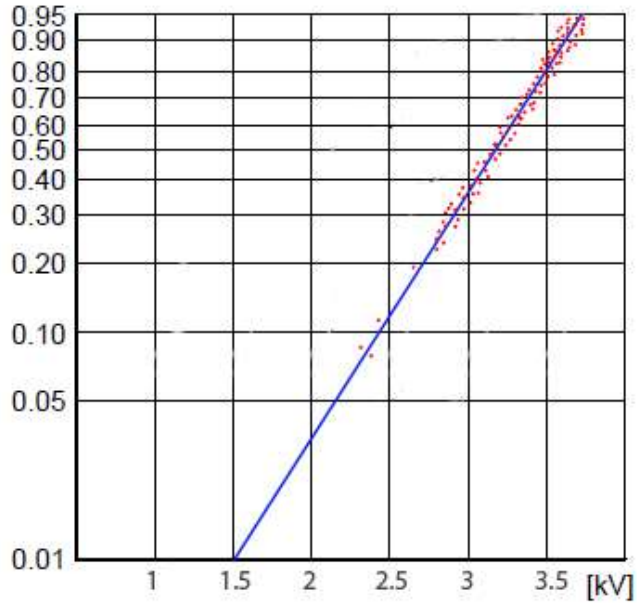
a)



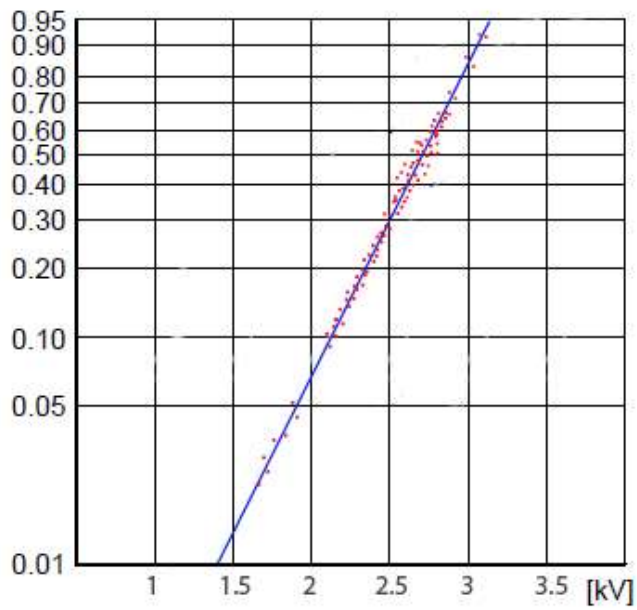
b)



c)

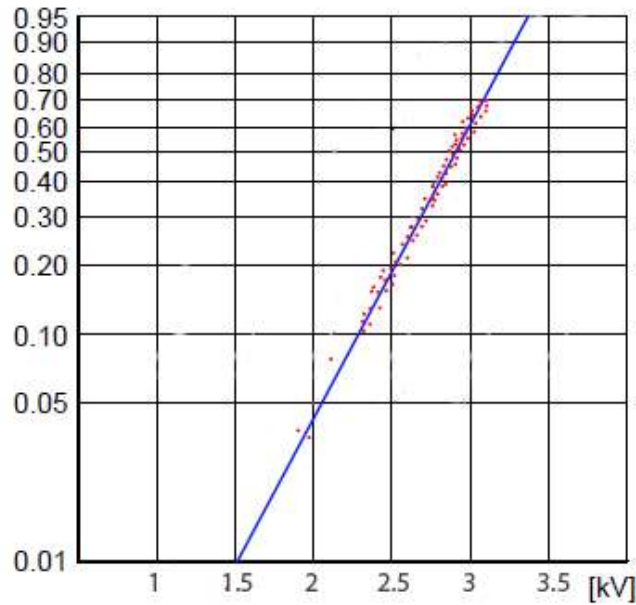


d)



e)



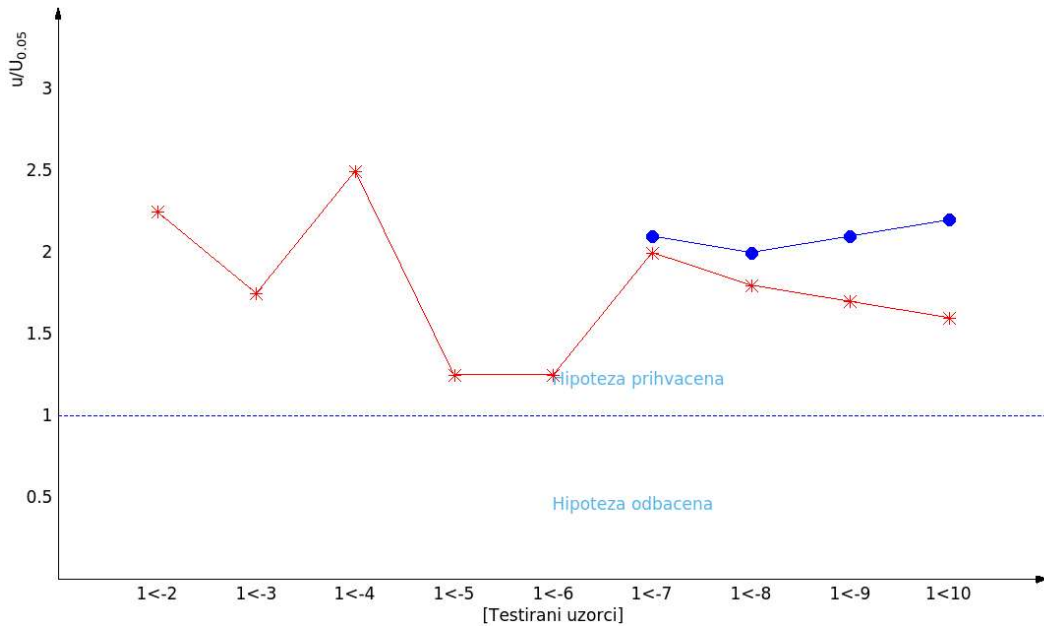


f)

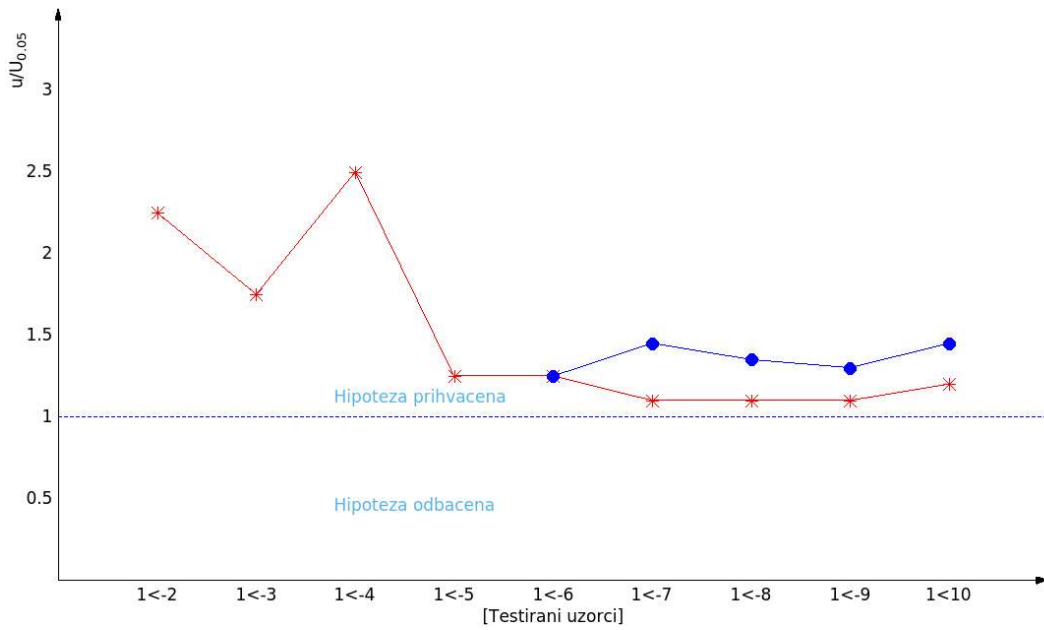
Slika 5.17 - Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja dobijene eksperimentalno za uzorke uzete sa pet godina korišćene kanure: a) višeslojni uzorak zona I; b) višeslojni uzorak zona II; c) višeslojni uzorak zona III; d) jednoslojni uzorak zona I; e) jednoslojni uzorak zona II; f) jednoslojni uzorak zona III

Rezultati prikazani na slici 5.17 pokazuju da slučajno promenjena vrednost praga parcijalnog pražnjenja dobijena za tankoslojne i debeloslojne uzorke uzete sa pet godina korišćene kanure pripada troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. Taj rezultat je potvrđen primenom  $\chi^2$  – testom i testom Kolmogorova sa statističkom nesigurnošću 1,2% i 1,8% respektivno. Što je važno kumulativne raspodele prikazane na slici 5.17 imaju veoma sličan oblik sa kumulativnim raspodelama prikazanim na slici 5.1. Analizirajući sliku 5.1 ustanovljeno je da je na njoj dobijena aditivna raspodela sastavljena od dve ili tri, u preciznoj analizi troparametarske raspodele. Kasnije je ustanovljeno da jedna od te dve raspodele pripada vrednostima parcijalnog pražnjenja iz zone III (manji deo pojava), a druga (veći deo pojava) pripada vrednostima parcijalnog pražnjenja iz zona I i II. Na slikama 5.17 je to potvrđeno i za debeloslojne i za tankoslojne uzorke uzete iz zone III i iz zona I i II. Naime, kumulativne statističke raspodele slučajne veličine vrednosti praga parcijalnog pražnjenja dobijene za uzorke odgovaraju po vrednostima i nagibu aditivnim komponentama sa slike 5.1.

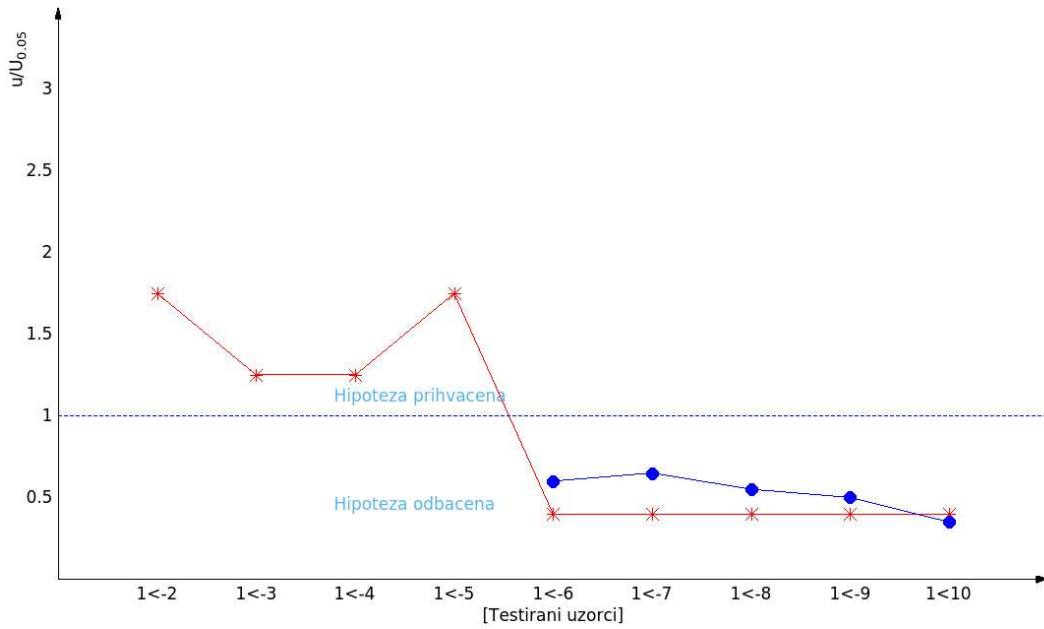
Ovakav zaključak potvrđuju i slike 5.18 i 5.19. Na slici 5.18 su prikazani rezultati U – testa za po 100 slučajnih promenljivih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja dobijenih merenjem na višeslojnim, tankoslojnim i složenim uzorcima (povezane dve zone I ili četiri zone II iz iste kanure), iz sve tri zone, uzetih iz kanure nakon pet godina korišćenja. Na slici 5.19 su prikazani rezultati U – testa za po 50 uzoraka slučajnih promenljivih dobijenih merenjem na višeslojnim i tankoslojnim uzorcima iz sve tri zone uzetih iz kanure nakon 5 godina korišćenja združeni u jedinstveni statistički uzorak sa 50 rezultata merenja slučajne promenjive praga parcijalnog pražnjenja na celoj kanuri korišćenoj 5 godina.



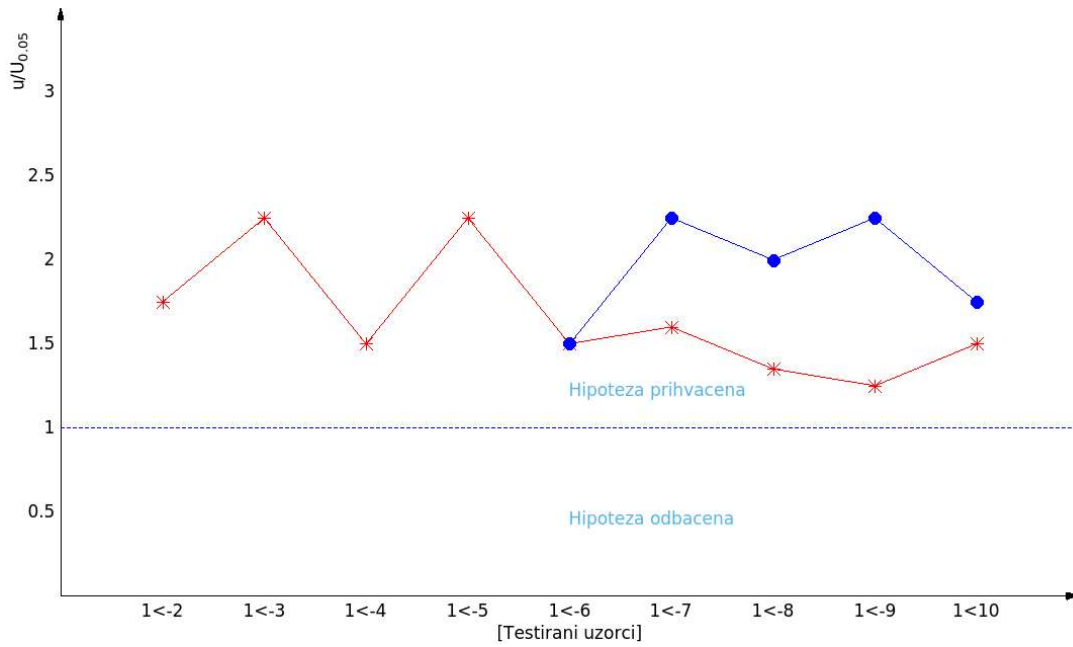
a)



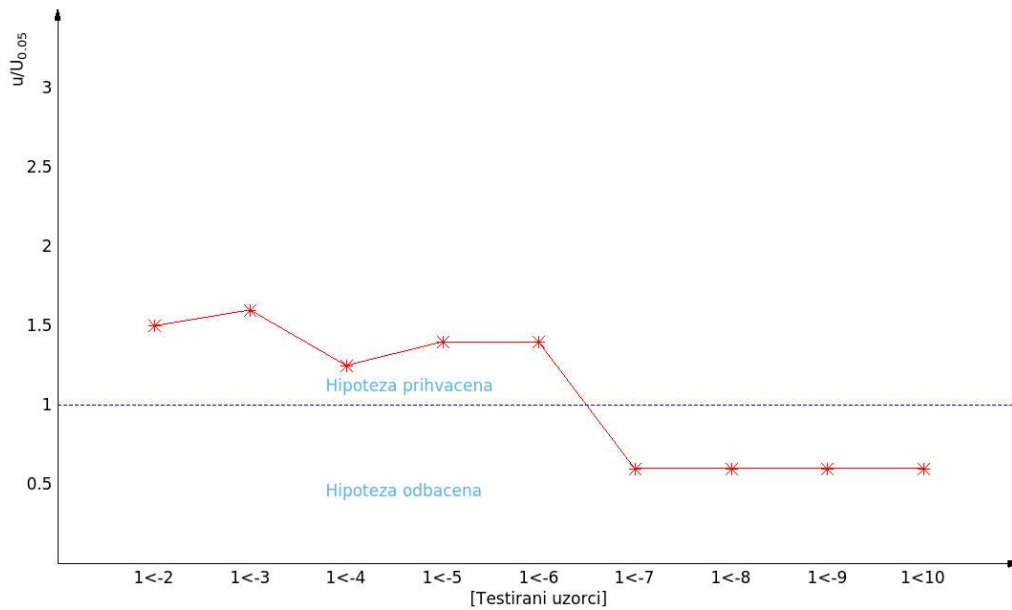
b)



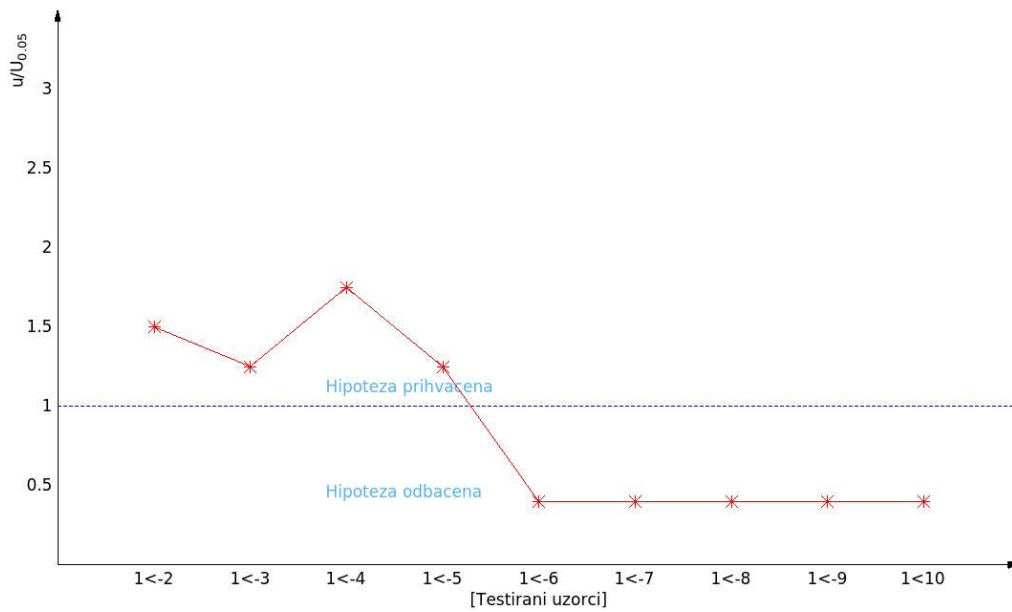
c)



d)



e)



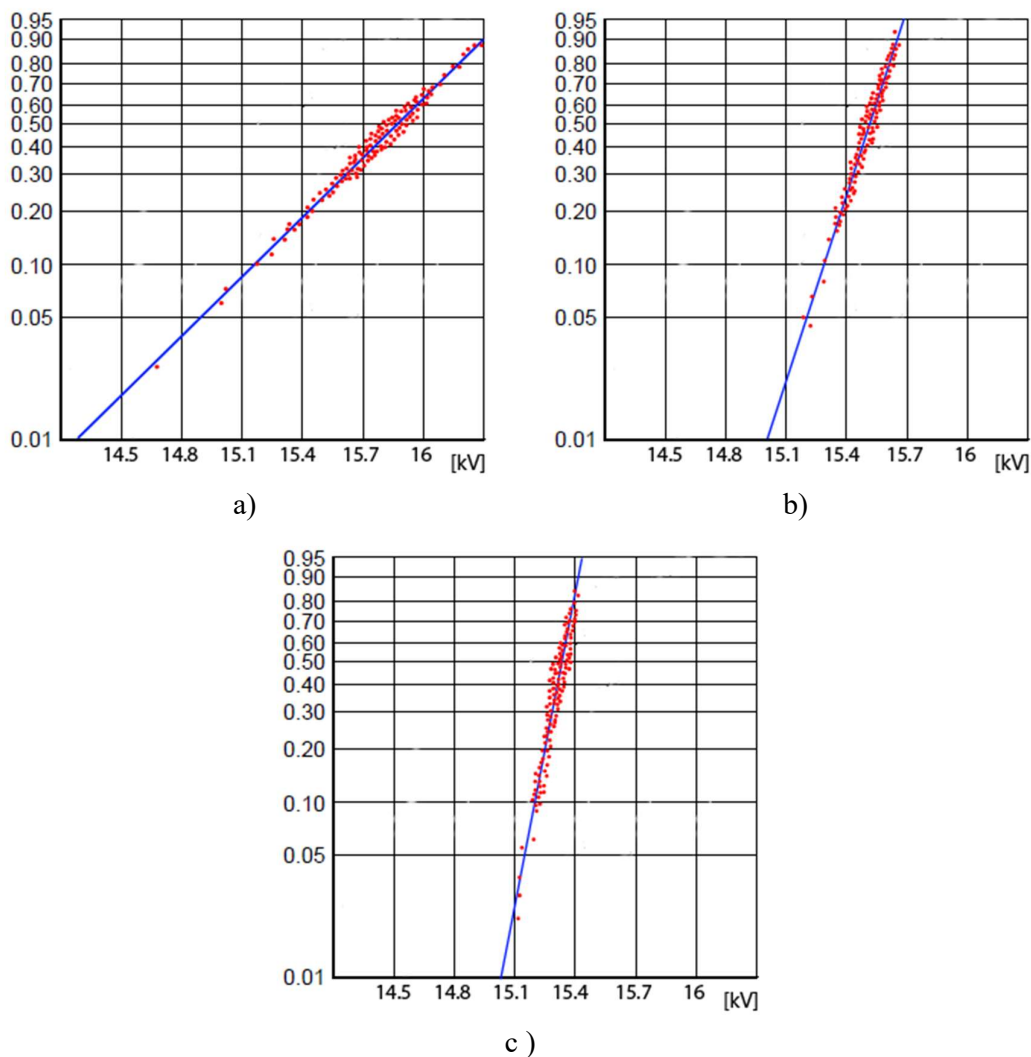
f)

Slika 5.18 - Rezultati U-testa primenjenog na hronološke uzorke od 10 slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja za 50 eksperimentalno dobijenih slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja za uzorke i za cele kanure za: a) višeslojni uzorak uzet iz zone I kanure; b) višeslojni uzorak uzet iz zone II kanure; c) višeslojni uzorak uzet iz zone III kanure; d) za jednoslojni uzorak uzet iz zone I kanure; e) za jednoslojni uzorak uzet iz zone II kanure; i f) za jednoslojni uzorak uzet iz zone III kanure. (\* - običan uzorak, • - složeni uzorak)

Na osnovu dobijenih rezultata moguće je zaključiti da li statistički uzorci prag parcijalnog pražnjenja i  $ac$  probojni napon (a time i probojno vreme) dobijeni uzorcima sa najvećim koeficijentom korelacije odgovaraju analognim statističkim uzorcima kanure, a samim tim i statoru obrtne mašine.

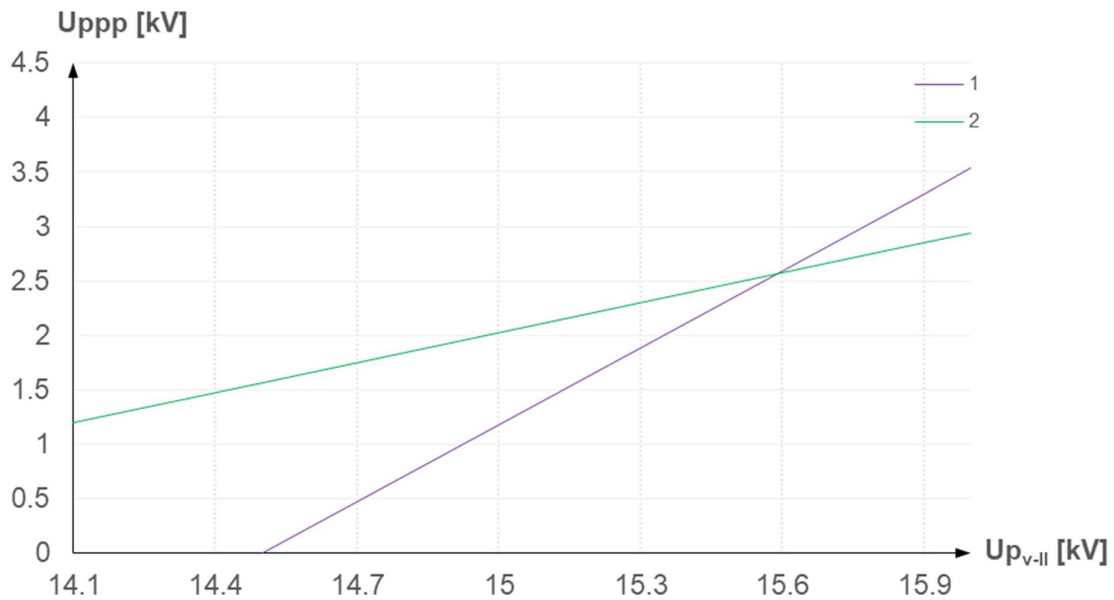
Na osnovu slika 5.18 i 5.19 može se zaključiti da slučajne promenjive vrednosti probojnog napona dobijene eksperimentima na uzorcima iz zone I, i debeloslojni i tankoslojni, pripadaju jedinstvenoj statističkoj raspodeli rezultata dobijenih eksperimentima na celoj kanuri. Pri tome su i uzorci i cele kanure uzeti sa obrtne mašine koja je provela 5 godina u pogonu. Ovaj zaključak je veoma važan pošto omogućava da se na mesto ispitivanja na kanurama mogu vršiti ispitivanja na uzorcima uzetim iz zone I kanure. Da bi se bilo sigurno u ovaj zaključak na slici 5.20 su prikazane regresivne prave za statističke uzorke dobijene merenjem na tankoslojnim uzorcima i uzorcima cele kanure.

Na slici 5.19 prikazane su statističke kumulativne raspodele slučajnih promenljivih probojnog napona kanura istih karakteristika i istorije kao kanura iz koje su uzeti prethodno ispitivani uzorci, tj. kanure su uzete sa statora iste obrtne mašine koja je u pogonu provela 5 godina kao i kanure sa kojih su uzeti ispitivani uzorci. Na osnovu grafika prikazanih na slici 5.19 može se tvrditi da statistički uzorci slučajnih promenljivih probojnog napona kanure pripadaju kombinovanim raspodelama aditivnog tipa koje se sastoje od 2 ili 3 troparametarske Vejbulove raspodele. Ovaj fenomen je već uočen i pokazano je da je aditivnost ovih statističkih raspodela posledica tehnološkog postupka proizvodnje kanure i različitog naprezanja koje trpe delovi kanura (zona) koje se nalaze u zonama statora (zona III) i zone koje se ne nalaze u žljebovima statora obrtne mašine.

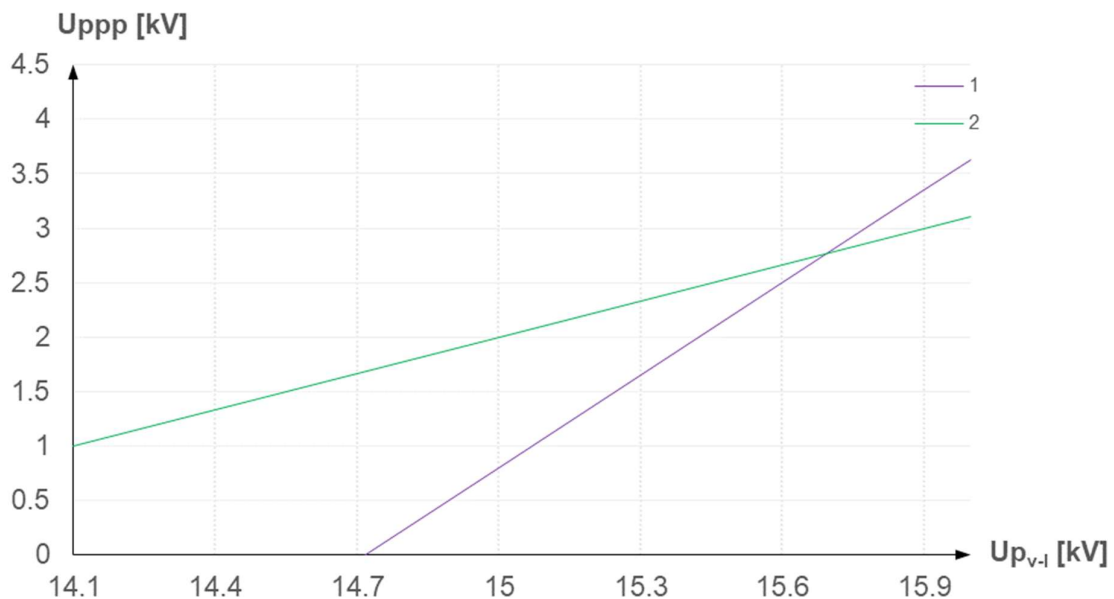


Slika 5.19 – Kumulativne statističke raspodele slučajnih promenljivih pobojnog napona: a) uzorak iz zone II jednoslojni; b) uzorak iz zone II višeslojni; c) uzorak iz zone I višeslojni.

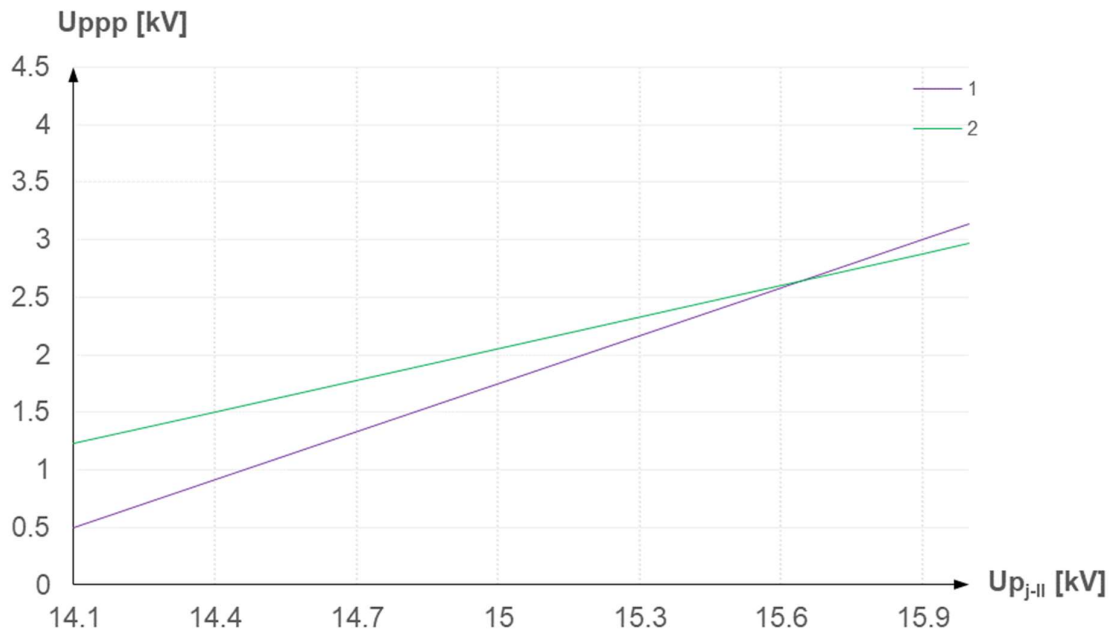
Kako je u praksi broj pojava slučajnih veličina praga parcijalnog pražnjenja i probojnog napona u zoni III kanure mali i ne može da se eliminiše, u daljem razmatranju će biti zanemaren što je statistički opravdano. Iz tog razloga na slikama 5.20 prikazane su regresione prave: a) kanura-višeslojni uzorak zone II; b) kanura-višeslojni uzorak zone I; c) kanura-jednoslojni uzorak zone II i d) kanura-jednoslojni uzorak zone I. Regresione prave su nacrtane na osnovu koeficijenta pravca i slobodnih članova određenih statističim uzorcima slučajnih promenljivih i izraza za linearnu regresiju: 3.11; 3.12; 3.13; 3.20; 3.21; 3.22; 3.23 i 3.24. Treba napomenuti da je prilikom prikazivanja regresionih pravih nije preporučljivo na istom dijagramu unositi i vrednosti slučajnih promenljivih statističkih uzoraka.



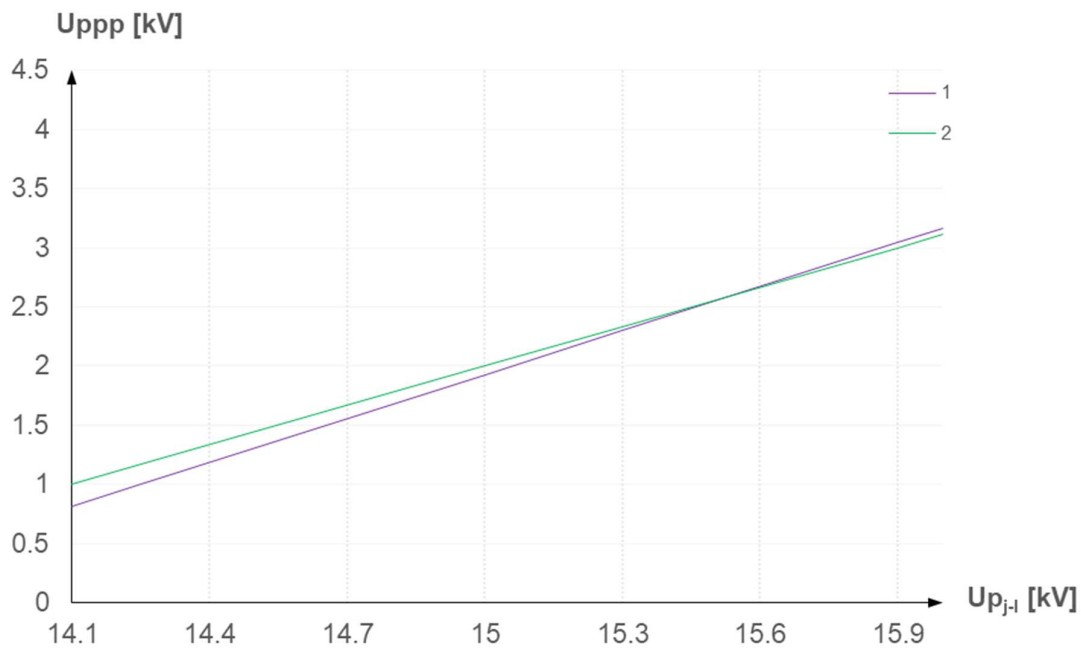
a)



b)



c)



d)

Slika 5.20 – Regresione prave za statističke uzorke slučajnih promenljivih prag parcijalnih pražnjenja i pobjnog napona: a) kanura-višeslojni uzorak zone II (1 –  $U_{ppp} = 2.36U_{p_{v-II}} - 34.18$ , 2 –  $U_{p_{v-II}} = 1.09U_{ppp} + 12.79$ ); b) kanura-višeslojni uzorak zone I (1 –  $U_{ppp} = 2.83U_{p_{v-I}} - 41.70$ , 2 –  $U_{p_{v-I}} = 0.90U_{ppp} + 13.20$ ); c) kanura-jednoslojni uzorak zone II (1 –  $U_{ppp} = 1.39U_{p_{j-II}} - 19.08$ , 2 –  $U_{p_{j-II}} = 1.09U_{ppp} + 12.76$ ) i d) kanura-jednoslojni uzorak zone I (1 –  $U_{ppp} = 1.24U_{p_{j-I}} - 16.64$ , 2 –  $U_{p_{j-I}} = 0.90U_{ppp} + 13.20$ ).

U tabeli 5.4 date su vrednosti koeficijenata korelacije statističkih uzoraka slučajnih veličina prag parcijalnog pražnjenja – uzorci (uzeti iz zona I i II, višeslojni, jednoslojni) kao i parovi statističkih uzoraka probojni napon – uzorci (uzeti iz zone I i II, višeslojni i jednoslojni). Pored vrednosti koeficijenata korelacije su dati i odgovarajući intervali poverenja.

**Tabela 5.4: Koeficijent korelacije sa intervalom poverenja za parove statističkih uzoraka slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja – probojni napon za višeslojne i jednoslojne uzorke uzetih iz zona I i II, i cele kanure**

	Koeficijent korelacije	Interval poverenja
<b>Višeslojni uzorci zona I</b>	0.85	0.78 – 0.90
<b>Višeslojni uzorci zona II</b>	0.83	0.81 – 0.93
<b>Jednoslojni uzorci zona I</b>	0.92	0.89 – 0.95
<b>Jednoslojni uzorci zona II</b>	0.89	0.80 – 0.90

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.4 ustanovljena je jaka korelacija između statističkih veličina prag parcijalnih pražnjenja i probojni napon za jednoslojne uzorke uzete iz zone I kanure i cele kanure. Na osnovu toga se može zaključiti da ispitivanjem uzoraka kanure uzetih iz njene zone I može da se dođe do reprezentativnih podataka o slučajnim veličinama prag parcijalnog pražnjenja i probojni napon a samim tim i odgovarajućih reprezentativnih podataka za izolacioni sistem celog statora obrtne mašine, pošto je prethodno ustanovljeno da kanura, sa visokim koeficijentom korelacije, reprezentuje osobine izolacione strukture statora obrtne mašine.

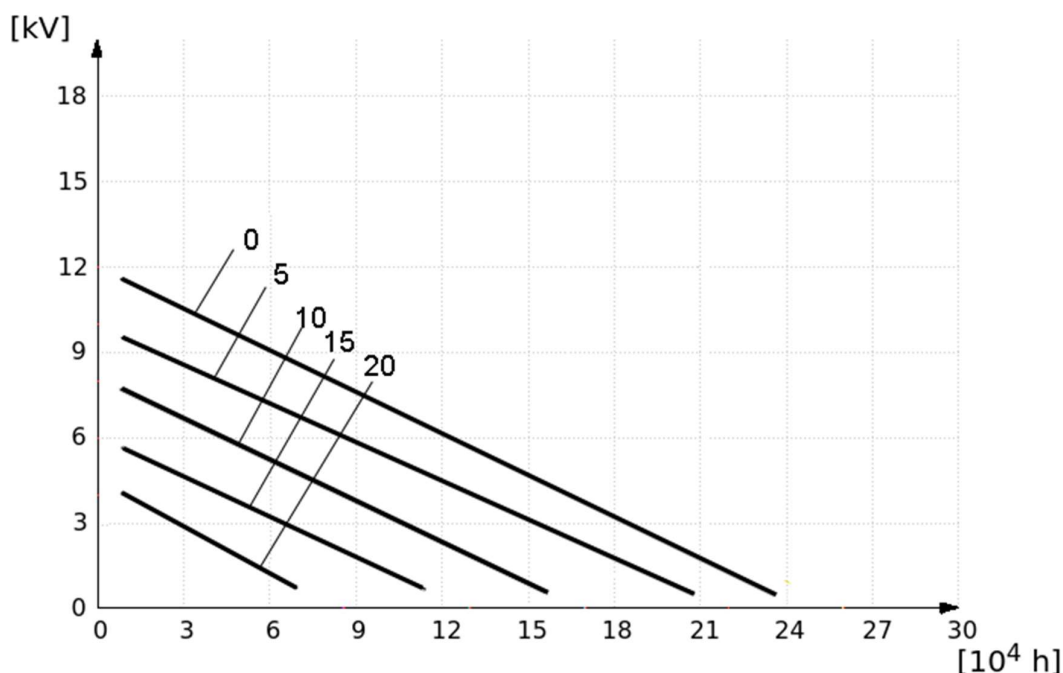
## **5.2. Provera tačnosti metoda za određivanja eksponenta životnog veka izolacionog sistema asinhronne obrtne električne mašine**

Do sada je pokazano da se merenjem statističkog uzorka slučajnih promenljivih vrednosti praga parcijalnog pražnjenja na uzorcima uzetim iz zone I kanure, u količini koja zadovoljava zahteve t raspodele, dobija statistički uzorak koji izuzetno dobro korelira sa statističkim uzorkom slučajne promenljive vrednosti probojnog napona izolacija statora obrtne mašine. Primenjeni postupak izrade i provere primenljivosti uzoraka, kao i postupak merenja metodom rastućeg napona uz svođenje rezultata na rezultate koji bi se dobili metodom merenja konstantnog napona, teoretski omogućava dobijanje vrednosti eksponenta životnog veka visoke tačnosti zavisne isključivo od veličine merenih statističkog uzorka.

Provera postupka određivanja eksponenta životnog veka bila je moguća pošto se raspolagalo identičnim kanurama koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina pod sličnim uslovima. Iz skupa tih kanura je izdvojeno po sto statistički identičnih uzoraka za svaki set po godinama starosti. Metodom rastućeg napona određeni uređeni parovi (probojni napon, probojno vreme). Na osnovu eksperimentalno dobijenih statističkih uzoraka i komercijalnog statističkog programa određeni su koeficijenti Vejbulove troparametarske raspodele za konstantnu vrednost napona i konstantnu vrednost vremena za svaki statistički uzorak uz broj godina koliko su kanure provele u pogonu. Nakon toga je primenom izraza određen eksponent životnog veka izolacije kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina. Dobijene vrednosti eksponenta veka trajanja bile su približno iste. To da su vrednosti eksponenta životnog veka bile iste je bio dobar pokazatelj da tokom vremena koje su provele u pogonu nije došlo do hemijskih promena u sistemu izolacije kanura. Imajući vrednost eksponenta životnog veka i srednju vrednost probojnog napona za svaki statistički uzorak uređenih parova (probojni napon, probojno vreme) za kanure koje su provele 5, 10, 15 i 20 godina u pogonu bilo je moguće nacrtati krive ostatka životnog veka uz vreme provedeno u pogonu kao parametrom.



Pošto se raspolagalo kanurama koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, kao i nove kanure, bilo je moguće da se sa svih tih kanura skinu identični uzorci i sa njima snime krive veka trajanja na način opisan u poglavlju 4. Postupak je urađen za isti kvantil verovatnoće od 63 %. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 5.21.



Slika 5.21 - Krive veka starenja novih (oznaka 0) i onih koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina

Sa slike 5.21 se vidi da se eksperimentalni podaci izuzetno dobro slažu sa poznatom činjenicom od utroška radnog veka eksperimentalno ispitivanih kanura. Ako se sa slike 5.21 skine ostatak veka trajanja kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina i oduzme od ostatka veka trajanja nove kanure dobiju se vrednosti koje dobro korespondiraju sa poznatim utrošenim vekom trajanja, tabela 5.5.

**Tabela 5.5: Dobijeni ostatak veka trajanja izvedenim algoritmom za uzorke poznate vrednosti utrošenog veka trajanja i poznatog veka trajanja**

<b>Ostatak veka trajanja [<math>10^3</math> h]</b>	259	214	170	133	85
<b>Utrošak veka trajanja [<math>10^3</math> h]</b>	0	45	88	125	183
<b>Vreme kanure u pogonu [<math>10^3</math> h]</b>	0	43	86	129	173

Na osnovu rezultata sa slike 5.21 i tabelle 5.5 može se smatrati da je metod za određivanje krivih veka trajanja koji je predložen u ovom radu, verifikovan i izuzetno pouzdan. Prikazani su rezultati samo za kvantil verovatnoće 63 %, međutim i za kvantile, 1 %, 25 %, 50 % i 80 % su izvršeni slični proračuni krivih ostatka veka trajanja i dobijeni rezultati su bili istog kvaliteta kao i prikazani rezultati za kvantil verovatnoće 63 %.

### 5.3. Rezultati i diskusija uticaja kombinovanog naprezanja na preostali životni vek i druge karakteristike izolacionog sistema asinhronne obrtne električne mašine

U potpoglavlju 5.1 dokazano da se ispitivanjem izolacionih svojstava jedne, ili više kanura, mogu izvršiti procene osobina izolacija celog statora obrtne mašine iz koje su ispitane kanure uzete. Takođe je dokazano da se procena izolacionih osobina kanure može predvideti na osnovu ispitivanja tačno određenih uzoraka uzetih sa kanure. U istom poglavlju je pokazano da se ostatak životnog veka obrtne mašine može odrediti merenjem parcijalnog pražnjenja na osnovu kojeg se određuju karakteristike životnog veka, odnosno njihov parametar  $r$  (eksponent životnog veka). Rečeno je da je cilj ovog rada da se ispitaju posledice eksploatacije obrtne mašine na njen životni vek. U ovom potpoglavlju se prikazuju rezultati tih ispitivanja, pri čemu se pored eksponenta životnog veka ispituju i drugi parametri izolacije koji govore o starenju izolacije statora obrtne mašine.

Pored eksponenta životnog veka  $r$  i krivih životnog veka u ovom potpoglavlju određivani su: tangens ugla gubitaka, napon praga parcijalnog pražnjenja,  $ac$  probojni napon, indeks polarizacije  $s$  (odnos otpora izolacije nakon 10 minuta od priključenja  $ac$  napona i nakon 1 minute nakon priključenja  $ac$  napona). Parametri kombinovanog naprezanja čiji se uticaj na izolaciju uzorka ispitivani (odnosno izolacionog sistema statora visokonaponske obrtne mašine) su bili: temperatura, mehaničke oscilacije, vlaga i dejstvo prenapona.

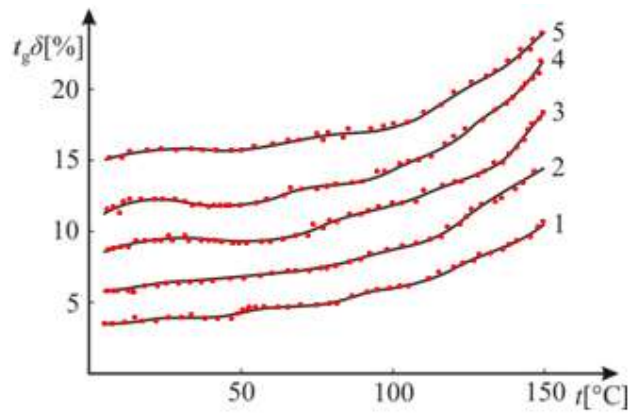
Sva merenja su vršena pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Korišćena je visoko kvalitetna merna oprema (sa malom vrednosti merne nesigurnosti tip B) i postupak merenja opisani u poglavlju 3. Eksperimentalno dobijeni rezultati su obrađivani statističkim metodama opisanim u poglavlju 4. Eksperimenti su vršeni na statorima obrtne električne mašine, kanurama uzetim iz statora istoga tipa i tačno određenim delovima tih kanura (za koje je ustanovljeno da najbolje reprezentuju izolaciona svojstva tih kanura). Sva pomenuta ispitivanja su vršena na obrtnim mašinama istog tipa, odnosno kanurama uzetih iz njih i uzorcima skinutih sa tih kanura, proizvedenim u fabrici Sever- Subotica, dobijenim standardnim visoko automatskim postupkom. Ni za jedan tip merenja kombinovana merna nesigurnost nije bila veća od 5 % (prilog).

Uticaj kombinovanog naprezanja na pouzdan rad obrtne električne mašine vršen je u dugotrajnom vremenskom periodu<sup>7</sup> na uzorcima uzimanim iz kanura koje su uzimane iz obrtnih mašina koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, novih kanura, i, naravno, na odgovarajućim statorima (kada se kaže korišćenih bilo statora obrtne mašine ili kanure podrazumeva se da je korišćena obrtna mašina provela tačno određen vek u pogonu, što onda važi i za kanure uzete iz nje). Prilikom statora obrtnih mašina, a samim tim i kanura koje su uzimane iz njih vodilo se računa da su sve mašine u pogonu provele vreme pod približno istim uslovima. Iz razloga sveobuhvatnosti i eventualnih postojanja sinergije prikazivani su rezultati uticaja pojedinačnih naprezanja i kombinovanih uz druge tipove relevantnih naprezanja. Takođe je prikazan i uticaj kombinovanog naprezanja na relevantne karakteristike izolacije kanure (uzoraka i cele). Starenje kanure tokom eksploatacije je prikazano karakteristikama životnog veka (dobijenih rastućim naponom) uz tipove naprezanja kao parametar [37]. Iz mnoštva dobijenih rezultata u radu su prikazani najkarakterističniji.

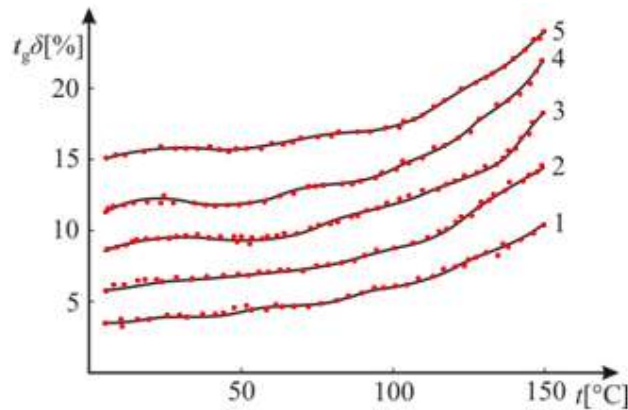
Na slici 5.22 je prikazana zavisnost  $tg\delta$  od temperature uzoraka uzetih sa zona I i II novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina. Prilikom ispitivanja zavisnosti tangensa ugla gubitaka, koeficijenta proporcionalnosti, napona praga parcijalnog pražnjenja,  $ac$  probojnog napona i indeksa polarizacije, broj merenja je bio veliki, pa su statistička odstupanja i oblast nepouzdanosti bili mali te nisu prikazivani sa rezultatima.

---

<sup>7</sup> U predgovoru je ukazano da se najveća zahvalnost za ovaj rad duguje prof. mr. Laslu Verebu koji je godinama skupljao kanure i statore obrtnih mašina istog tipa i eksperimentisao sa njima. Uzorci sa kojima su vršeni eksperimenti prikazani u ovom radu su dobijeni od profesora Vereba.



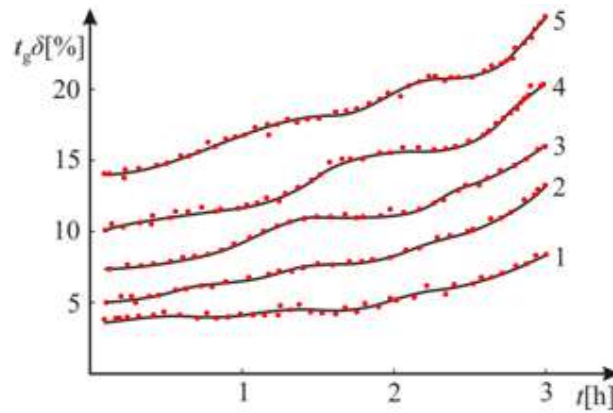
a)



b)

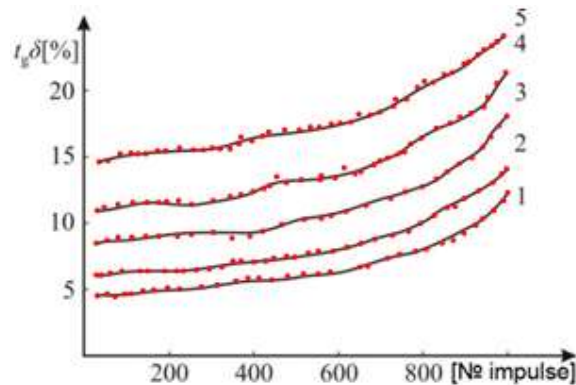
Slika 5.22 - Zavisnost  $tg\delta$  od temperature uzorka: a) uzorak uzet sa zone I kanure; b) uzorak uzet sa zone II kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina.

Na slici 5.23 je prikazana zavisnost  $tg\delta$  od vremena trajanja mehaničkog naprežanja uzoraka sa zone I novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina. Prilikom ispitivanja zavisnosti  $tg\delta$  od vremena trajanja mehaničkog naprežanja uzoraka uzetih sa kanura vremenski korak je bio 10 min, a ispitivanja su vršena na 50 uzoraka (za koje je prethodno ustanovljena statistička jednakost).



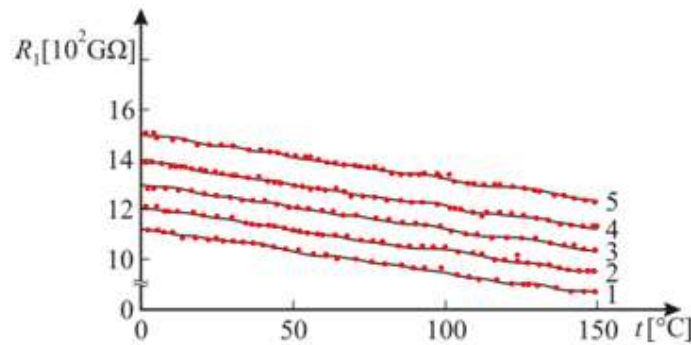
Slika 5.23 - Zavisnost  $t_g \delta$  od vremena trajanja mehaničkog naprezanja merena na uzorcima uzetih sa zone I kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina.

Na slici 5.24 je prikazana zavisnost  $t_g \delta$  od broja naprezanja impulsnim naponom  $1.2/50 \mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog  $ac$  napona) na osnovu merenja na uzorcima uzetih sa zone I novih kanura i kanura koje su u pogonu provele neko tačno određeno vreme.



Slika 5.24 - Zavisnost  $t_g \delta$  od broja naprezanja impulsnim naponom  $1.2/50 \mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog  $ac$  napona) merena na uzorcima uzetih sa zone I kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina.

Na slici 5.25 je prikazana zavisnost otpora izolacije  $R_1$  od temperature dobijenih na osnovu merenja na uzorcima uzetih sa zone I novih kanura i kanura uzetih iz mašina koje su u pogonu provele neko tačno vreme. Prilikom ispitivanja zavisnosti otpora izolacije  $R_1$  od temperature uzoraka sa kanura, temperaturni korak je bio  $10^\circ C$ , a ispitivanja su vršena na 50 uzoraka (za koje je prethodno ustanovljena statistička jednakost).



Slika 5.25 - Zavisnost otpora izolacije  $R_1$  od temperature merene na uzorcima uzetih sa zone I kanure: 1 – uzorak uzet sa nove kanure, 2 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 20 godina.

Zavisnosti  $\text{tg}\delta$  i  $R_1$  od temperature, slike 5.22 – 5.25 (kao i drugi neprikazani rezultati), dobijene na osnovu merenja na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih i kanura koje su u pogonu provele tačno određeno vreme pokazuju da duže vreme korišćenja i porast temperature dovode do slabljenja izolacije provodnika kanure. To je najizraženije u slučaju uzoraka uzetih iz zone I, a najmanje izraženo u slučaju uzoraka uzetih iz zone III. Takav efekat se može objasniti tehnološkim postupkom izrade kanure. Naime, tokom izrade kanure, zona I i zona II trpe mehaničko naprezanje koje dovodi do mikro naprslina izolacione trake i provodnika. Sa porašću temperature ove naprsline se šire i povećavaju broj i dimenzije provodnih mostova u izolacionoj traci. Sličan efekat ima i životni vek korišćenja kanura. Temperatura nastala zagrevanjem provodnika, mehaničko naprezanje usled oscilovanja obrtne mašine, pojava prenaponskih impulsa i vlaga (kao i drugi ambijentalni uticaji zavisni od uslova primene) šire, povećavaju i stvaraju nove provodne mostove u izolaciji provodnika kanure. Usled pomenutih efekata može da dođe i do raslojavanja kanure zašto su najviše odgovorni pozitivni sinergistički efekti temperature (kao najizraženijeg destruktivnog naprezanja), mehaničko naprezanje, tehnološki postupak izrade kanure i vreme provedeno u pogonu obrtne mašine (iz koje je uzeta kanura). Ovim putem izazvana degradacija izolacije je proporcionalna broju mikro naprslina izolacione trake (slabih mesta izolacije) nastalih tehnološkim postupkom izrade kanure.

Kako uslovi rada i tehnološki postupak izrade kanure utiču na promenu izolacionih karakteristika izolacije provodnika ( $\text{tg}\delta$ ,  $R_1$ ,...) najbolje pokazuje njihov uticaj na indeks polarizacije. U tabeli 5.6 date su zavisnosti indeksa polarizacije izolacije uzoraka uzetih sa oblasti I, II i III novih i kanura koje su u pogonu provele tačno određeno vreme u zavisnosti od temperature, vremena trajanja mehaničkog naprezanja, broja naprezanja impulsnim naponom  $1.2/50 \mu\text{s}$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog  $ac$  napona) i vlage.

Prilikom merenja zavisnosti indeksa polarizacije od temperature uzoraka uzetih sa kanure korišćene su 3 temperature ( $-5^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ) pri konstantnoj vlažnosti od 20 %. Ispitivanja su vršena na 50 uzoraka (za koje je prethodno ustanovljena statistička jednakost) po 50 puta uz pauzu između dva različita mesta na uzorku od pola minuta, tj. svaki podatak u tabeli za indeks polarizacije je srednja vrednost od 2500 izmerenih vrednosti. Prilikom merenja zavisnost indeksa polarizacije od vremena izloženosti mehaničkom naprezanju, vlažnost je bila 20 % dok je temperatura bila  $20^\circ\text{C}$ . Sve ostalo je bilo isto kao kod merenja zavisnosti indeksa polarizacije od temperature.

Prilikom merenja zavisnosti indeksa polarizacije od broja impulsa opterećenja impulsima  $1.2/50 \mu\text{s}$  bile su konstantne vlažnost 20 % i temperatura  $20^\circ\text{C}$ . Pauza između dva merenja sa dva uzastopna impulsna napona bila je jedan minut. Sve ostalo je bilo isto kao kod merenja zavisnosti indeksa polarizacije od temperature.

Prilikom merenja zavisnosti indeksa polarizacije od vlažnosti, temperatura je bila  $20^\circ\text{C}$ . Sve ostalo je bilo isto kao kod merenja zavisnosti indeksa polarizacije od temperature.

Merenja za tri temperature, za tri trajanja vibracije, za tri naprezanja naponom i za tri vrednosti vlage bila su kompromis između dovoljne informacije i potrebnog da se merenja izvrše.

**Tabela 5.6: Zavisnost indeksa polarizacije od: a) temperature (za vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %) i d) vlažnosti (za temperaturu 20°C);  
merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno.**

a)

Indeks polarizacije $s$	Godine rada	Temperatura [°C]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	-5	2.95	3.98	4.01
		80	3.91	4.22	4.25
		150	3.82	4.05	4.16
	5	-5	2.81	3.81	3.01
		80	3.63	4.01	4.10
		150	3.09	3.11	3.95
	10	-5	2.84	3.68	2.95
		80	3.11	3.92	4.01
		150	2.85	2.90	3.01
15	-5	2.63	3.50	2.81	
	80	3.21	3.81	3.90	
	150	2.51	2.57	2.95	
20	-5	2.48	2.59	2.68	
	80	3.01	3.77	3.64	
	150	2.11	2.17	3.02	

b)

Indeks polarizacije <i>s</i>	Godine rada	Vreme [h]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	1	3.56	3.99	4.02
		2	3.38	3.79	4.00
		3	3.28	3.72	3.91
	5	1	3.21	3.59	3.82
		2	3.18	3.48	3.79
		3	3.15	3.35	3.75
	10	1	3.05	3.29	3.68
		2	2.95	3.24	3.59
		3	2.85	3.10	3.54
15	1	2.80	3.01	3.28	
	2	2.78	2.95	3.25	
	3	2.75	2.82	3.20	
20	1	2.70	2.79	3.15	
	2	2.63	2.70	3.10	
	3	2.53	2.68	3.05	

c)

Indeks polarizacije <i>s</i>	Godine rada	Broj impulsa	Zona I	Zona II	Zona III
	0	100	3.62	3.81	4.04
		500	3.38	3.52	4.01
		1000	3.24	3.38	3.95
	5	100	3.43	3.61	3.85
		500	3.21	3.46	3.75
		1000	3.12	3.22	3.70
	10	100	3.10	3.12	3.68
		500	2.98	3.02	3.45
		1000	2.91	3.00	3.45
	15	100	2.92	2.95	3.30
		500	2.81	2.91	3.28
		1000	2.77	2.89	3.16
	20	100	2.78	2.85	3.10
		500	2.73	2.84	3.01
1000		2.70	2.81	2.95	

d)

Indeks polarizacije s	Godine rada	Vlaga [%]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	20	4.08	4.35	4.40
		60	3.95	4.15	4.35
		90	3.51	4.01	4.21
	5	20	3.82	4.10	4.38
		60	3.61	3.95	4.35
		90	3.41	3.73	4.16
	10	20	3.78	3.90	4.29
		60	3.51	3.72	4.25
		90	2.95	3.12	4.12
15	20	3.22	3.38	4.02	
	60	2.95	3.23	3.91	
	90	2.82	3.01	3.81	
20	20	2.79	3.21	3.82	
	60	2.62	2.91	3.78	
	90	2.48	2.61	3.61	

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.6 može se zaključiti da, pojedinačno posmatrano, vlaga najviše utiče na opadanje indeksa polarizacije izolacije provodnika (čak je indeks polarizacije uzorka iz zone I uzetog nakon 20 godina rada ispod kritične vrednosti 2.5 za relativnu vlažnost 90 %). Posle vlažnosti na indeks polarizacije provodnika najviše utiče vreme izloženosti mehaničkim napreznjima (oscilacijama) i temperatura. U slučaju temperature treba ukazati da je indeks polarizacije uočljivo nizak pri negativnim temperaturama. To je izuzetak od pojedinačnog uticaja ostalih ispitivanih tipova napreznja. Naime, sva ispitivana napreznja dovode do degradacije izolacije čiji stepen monotono raste sa starošću uzorka i intenziteta napreznja. Pri tome je degradacija uvek najizraženija u slučaju uzoraka uzetih sa zone I kanure, a najmanje izražena u slučaju uzoraka uzetih sa zone III. Ovakvi rezultati se uklapaju u prethodno izneseno tumačenje po kojem napreznja dovode do povećanja i porasta broja slabih mesta izolacije provodnika. Takvo tumačenje potvrđuje i statistička obrada statističkog uzorka slučajne veličine indeks polarizacije (vrednosti u tabeli 5.6 su dobijene kao očekivana vrednost momentnom metodom statističkog uzorka od 50 realizacija slučajnih promenljivih). Statistički uzorak od 50 slučajnih promenljivih omogućava pouzdano statističko zaključivanje (prema t-testu). Dobijene vrednosti od 50 slučajnih promenljivih indeksa polarizacije su ubacivani u komercijalni program kojim je ustanovljeno da u slučaju većih srednjih vrednosti indeksa polarizacije slučajne promenljive pripadaju Normalnoj raspodeli (tj. imaju najmanju statističku nesigurnost, 4.2 % u slučaju testiranja na Normalnu raspodelu), a u slučaju nižih srednjih vrednosti indeksa polarizacije pripadaju Vejbulovoj raspodeli (tj. imaju najmanju statističku nesigurnost 3.8 % u slučaju testiranja na Vejbulovu raspodelu) [38, 39].

Kao što je naglašeno rezultati prikazani u tabeli 5.6 su dobijeni pojedinačnom varijacijom tipa napreznja (parametra eksperimenta). Na osnovu tako dobijenih rezultata određeni su najinteresantniji kombinovani tipovi napreznja i određen je njihov sinergistički efekat. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 5.7.



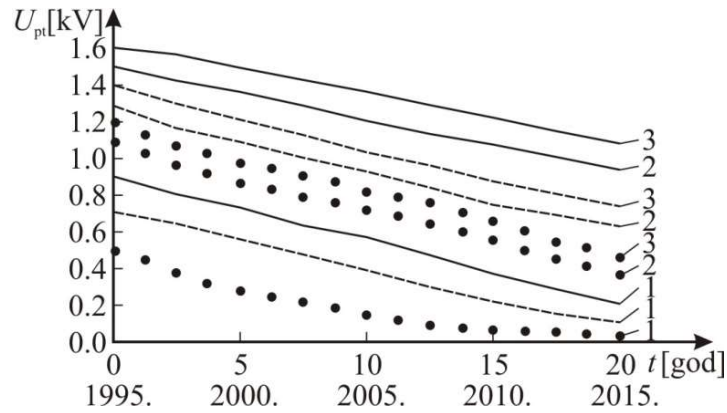
**Tabela 5.7: Zavisnost indeksa polarizacije od sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom naprezanju, broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima; merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno.**

Godine rada	Temperatura [°C]	Vreme [h]	Broj impulsa	Vlaga [%]	s/Zona I	s/Zona II	s/Zona III
0	- 5	3	1000	90	3.14	3.14	3.80
5	- 5	3	1000	90	2.72	2.91	3.00
10	- 5	3	1000	90	2.41	2.62	2.81
15	- 5	3	1000	90	2.32	2.41	2.72
20	- 5	3	1000	90	2.21	2.22	2.54

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.7 je očigledno da efekti naprezanja na indeks polarizacije nisu aditivni u kombinovanom naprezanju primenom karakteristike životnog veka. Sinergistički efekat postoji i dovodi do smanjenja indeksa polarizacije ispod kritične vrednosti u mnogim slučajevima. Smanjenju vrednosti indeksa polarizacije najviše doprinosi tehnološki postupak izrade kanure, vreme, vlaga i mehaničko naprezanje. To ukazuje da su mehanička oštećenja izolacije koje pomenuta naprezanja prouzrokuju presudna za opadanje vrednosti indeksa polarizacije. Ovo se može objasniti činjenicom da mehanička oštećenja izolacije provodnika olakšavaju (u kombinaciji sa vlagom) nastanak provodnih mostova. Pošto se nastanak provodnih mostova odvija u realnom vremenu sa vremenskom konstantom reda veličine 1 minut, ovaj proces dovodi do opadanja indeksa polarizacije. Ovo potvrđuje i činjenica da statistička raspodela slučajne promenljive „indeks polarizacije“ sa povećanjem broja mehaničkih naprezanja i vremena prelazi iz Normalne u Vejbulovu raspodelu. Naime, ovi tipovi naprezanja dovode do porasta broja slabih mesta izolacije što raspodelu slučajne promenljive „indeks polarizacije“ čini nesimetričnom.

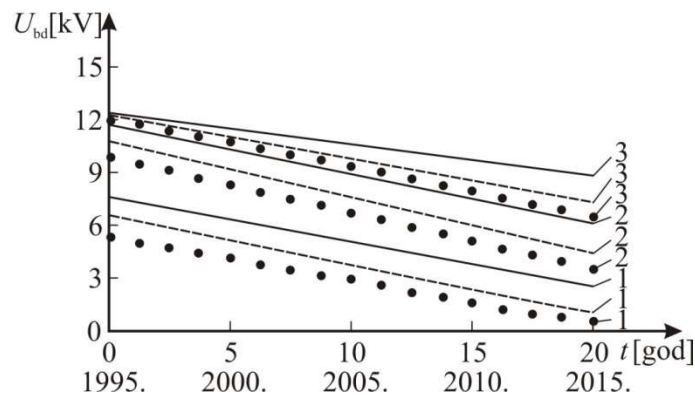
Pošto električni proboj izolacije provodnika dovodi do uništenja kanure to je predviđanje ove pojave (i njeno sprečavanje blagovremenim remontom) od velike važnosti za produženje radnog veka obrtne električne mašine. Da bi se, nedestruktivno, predvideo proboj izolacije provodnika potrebno je pratiti parcijalno pražnjenje na izolaciji provodnika i poznavati korelaciju između vrednosti napona praga parcijalnog pražnjenja i vrednosti probojnog napona. Obe ove vrednosti se menjaju sa vremenom eksploatacije obrtne električne mašine.

Na slici 5.26 prikazana je zavisnost napona praga parcijalnog pražnjenja od vremena uzoraka uzetih sa zona I, II i III kanure koja je provela u pogonu tačno određeno vreme, uz jednosatno mehaničko naprezanje i 1000 naprezanja impulsnim naponom 1.2/50  $\mu$ s. Pritom je amplituda  $ac$  napona u uzorku bila 20 % niža od pojave praga parcijalnog pražnjenja na uzorku u trajanju proticanja ove struje od 30 minuta (što je ustanovljeno snimanjem osciloskopom tokom tih 30 minuta bez pojave izbijanja parcijalnog pražnjenja).



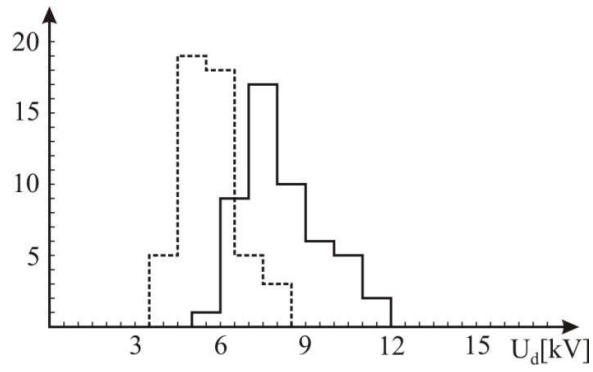
Slika 5.26 - Zavisnost napona praga parcijalnog pražnjenja od vremena uzoraka uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 15 godina, uzetih sa zona I (1), II (2) i III (3) kanure; — bez naprezanja, - - - - jednosatno mehaničko naprezanje i •••• 1000 naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude uslovno nominalnog *ac* napona)

Na slici 5.27 prikazana je zavisnost probojnog napona od vremena uzoraka uzetih sa kanura koje su provele u pogonu tačno određeno vreme, sa zona I, II i III kanure uz jednosatno mehaničko naprezanje i 1000 naprezanja impulsnim naponom 1.2/50  $\mu$ s (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona).

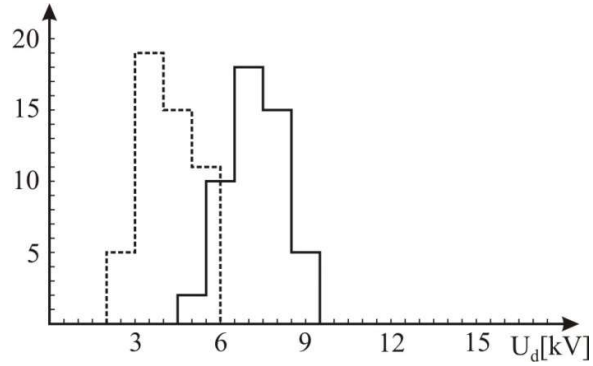


Slika 5.27 - Zavisnost probojnog napona od vremena uzorak uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 10 godina, sa zona I (1), II (2) i III (3) kanure; — bez naprezanja, - - - - jednosatno mehaničko naprezanje i •••• 1000 naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona)

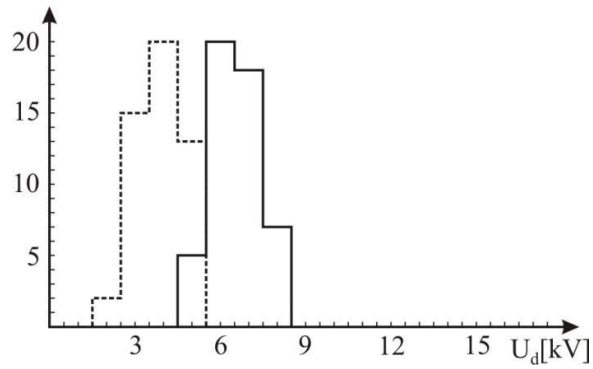
Na slici 5.28 prikazani su histogrami klase  $[1 + 3.3\log n]$  statističkog uzorka slučajne promenljive probojni napon novih i korišćenih uzoraka uz zonu iz koje su uzeti kao parametar.



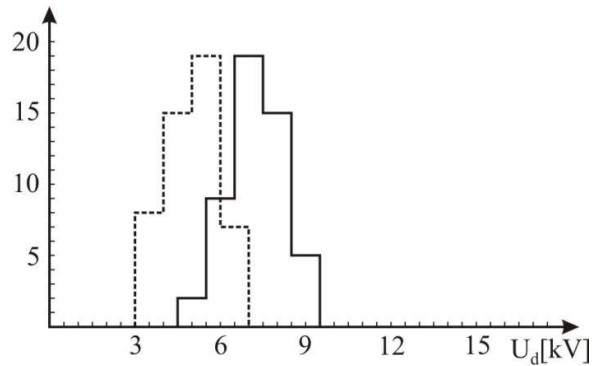
a)



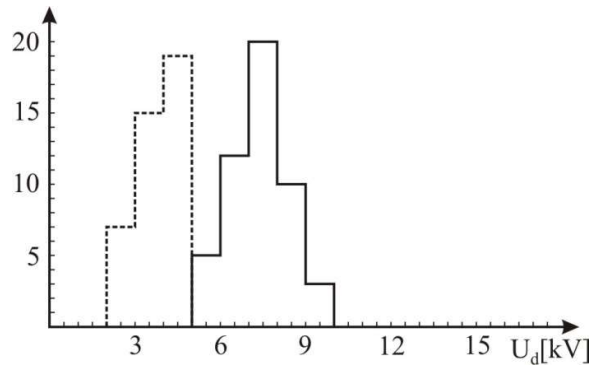
b)



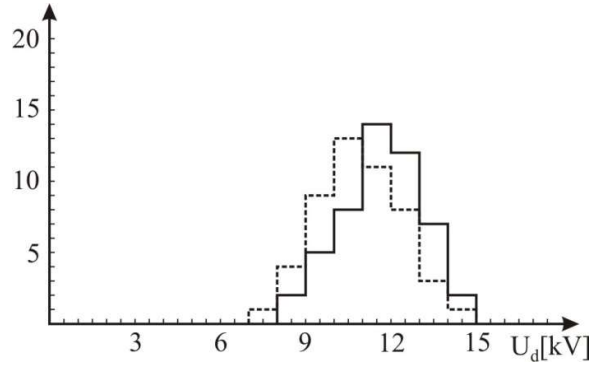
c)



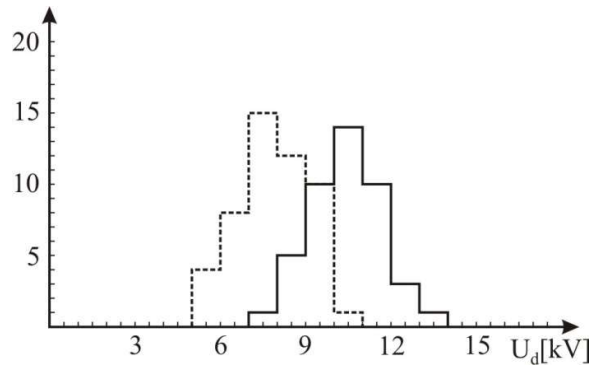
d)



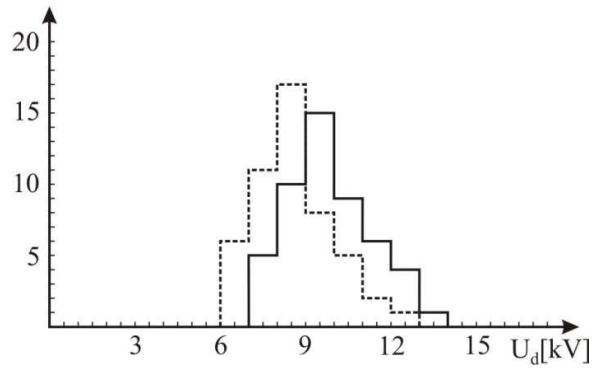
e)



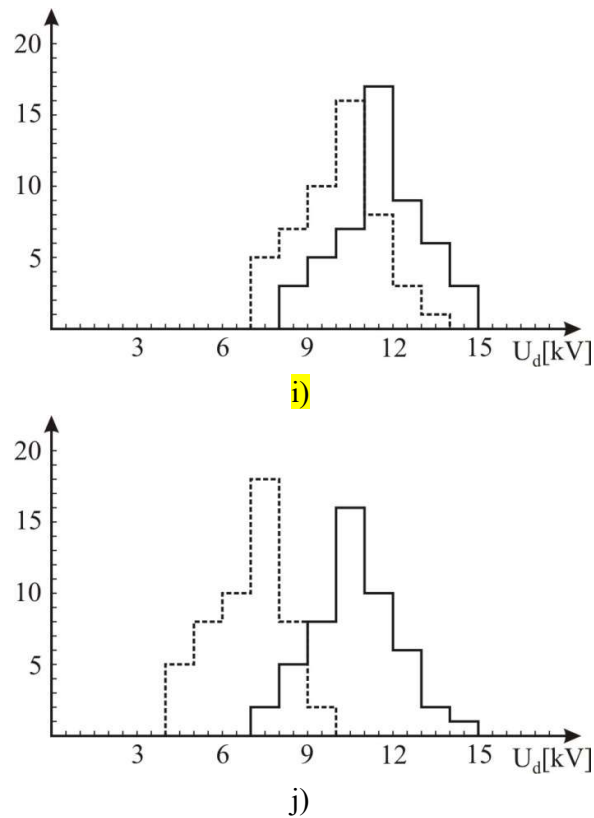
f)



g)



h)



Slika 5.28 - Histogram<sup>8</sup> (klase  $1+3.3\log n$ ;  $n$  – veličina statističkog uzorka) slučajne veličine  $ac$  probojnog napona, — nov uzorak, - - -uzorak uzet sa kanure koja je u pogonu provela 10 godina: a) zona III; b) zona I, tri sata mehaničkog naprezanja; c) zona III, 1000 naprezanja impulsnim naponom; d) zona III, 90°C temperatursko naprezanje; e) zona III, 90 % vlaga; f) zona I; g) zona I, tri sata mehaničkog naprezanja; h) zona I, 90°C temperatursko naprezanje; j) zona I, 90 % vlaga

Testiranje statističkih uzoraka slučajnih promenljivih prag parcijalnog pražnjenja i probojni napon izolacije provodnika pokazuje da ove slučajne promenljive za nove uzorke najviše odgovaraju Normalnoj raspodeli. Iste slučajne promenljive za korišćene uzorke pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli, pri čemu je statistička nesigurnost utoliko manja ukoliko je uzorak duže korišćen. Ovi efekti su najizraženiji u zoni I, a najmanje u zoni III. Takođe, nakon mehaničkih naprezanja i naprezanja impulsnim naponom, smanjuje se statistička nepouzdanost pripadnosti statističkih uzoraka slučajnih veličina prag parcijalnog pražnjenja i probojni napon korišćenih uzoraka troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli.

Između vrednosti napona praga parcijalnog pražnjenja i vrednosti probojnog napona postoji linearna veza  $U_{bd} = kU_{tp}$  (gde je  $U_{bd}$  vrednost probojnog napona,  $U_{tp}$  vrednost napona praga parcijalnog pražnjenja i  $k$  koeficijent proporcionalnosti) [23]. Vrednost koeficijenta proporcionalnosti

<sup>8</sup> Kao što je već pomenuto klasa histograma nije proizvoljna veličina pošto bi to omogućavalo dobijanje željenog oblika histograma koji ne bi pružao mogućnost tačnog zaključivanja i poređenje srodnih histograma. Svetska metrološka konferencija preporučuje za broj slučajnih promenljivih koji se koristi u ispitivanju u ovom radu preporučuje klasu histograma  $1 + 3.3\log n$  ( $n$  je broj slučajnih promenljivih). Pored ovih klasa histograma za veće veličine statističkog uzorka se koriste klase histograma  $\sqrt{n}$  i  $1+1/2\sqrt{n}$ . Podele na apcisi se dobijaju deljenjem ispitne vrednosti sa vrednošću klase histograma. Ispitna vrednost se usvaja po pravilu dva ili više puta veće od oblasti u kojoj se ispitne pojave javljaju. Na slici 5.7 klasa histograma je  $\approx 11$  dok je oblast ispitne vrednosti  $\approx 20$  kV pa je za korak histograma na apcisi uzeta vrednost 2 kV. U ovom postupku ima zaokruživanja koja su dozvoljena ako ne utiču na oblik histograma. Ordinata može biti ili samo broj uočenih rezultata unutar jednog koraka histograma ili isti broj izražen procentualno.

je vrlo dobar pokazatelj stepena destruktivne degradacije izolacije provodnika kanure (a i uopšte). U tabeli 5.8 date su zavisnosti koeficijenta proporcionalnosti za uzorke uzete sa zona I, II i III novih i kanura koje su u pogonu provele tačno određeno vreme, od temperature, od vremena trajanja mehaničkog naprezanja, od broja naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona) i od vlage.

Prilikom merenja zavisnosti koeficijenta proporcionalnosti od temperature uzoraka uzetih sa kanura koja je u pogonu provela tačno određeno vreme *t* za 3 temperature (-5°C, 80°C, 150°C) pri konstantnoj vlažnosti od 20 %. Ispitivanja su vršena na 50 uzoraka (za koje je prethodno ustanovljena statistička jednakost), pa je svaki podatak u tabeli rezultat 50 izmerenih vrednosti. Prilikom merenja zavisnosti koeficijenta proporcionalnosti od vremena izloženosti mehaničkom naprezanju, vlažnost je bila 20 % dok je temperatura bila 20°C. Sve ostalo je bilo isto kao kod merenja zavisnosti koeficijenta proporcionalnosti od temperature.

Prilikom merenja zavisnosti koeficijenta proporcionalnosti od broja impulsa opterećenja impulsima oblika 1.2/50  $\mu$ s bile su konstantne vlažnost 20 % i temperatura 20°C. Pauza između dva merenja sa dva uzastopna impulsna napona bila je jedan minut. Sve ostalo je bilo isto kao kod merenja zavisnosti koeficijenta proporcionalnosti od temperature.

Za novi uzorak statistička nesigurnost statističkog uzorka prečišćenog Šoveneovim kriterijumom testiran na Normalnu raspodelu ima statističku nesigurnost 4.7 %, dok isti uzorak testiran na troparametarsku Vejbulovu raspodelu ima statističku nesigurnost 6.2 %. Za uzorke testirane nakon 5 godina u eksploataciji prečišćene Šoveneovim kriterijumom testirane na Normalnu raspodelu statistička nesigurnost je 5.2 %, a za isti uzorak testiran na troparametarsku Vejbulovu raspodelu ima statističku nesigurnost 4.9 %. Za uzorke testirane nakon 10 godina u eksploataciji prečišćene Šoveneovim kriterijumom testiran na Normalnu raspodelu statistička nesigurnost je 5.9 %, a za isti uzorak testiran na troparametarsku Vejbulovu raspodelu ima statističku nesigurnost 3.8 %. Za uzorke testirane nakon 15 godina u eksploataciji prečišćene Šoveneovim kriterijumom testiran na Normalnu raspodelu statistička nesigurnost je 6.3 %, a za isti uzorak testiran na troparametarsku Vejbulovu raspodelu ima statističku nesigurnost 3.6 %. Za uzorke testirane nakon 20 godina u eksploataciji prečišćene Šoveneovim kriterijumom testiran na Normalnu raspodelu statistička nesigurnost je 5.9 %, a za isti uzorak testiran na troparametarsku Vejbulovu raspodelu ima statističku nesigurnost 3.5 %.

**Tabela 5.8: Zavisnost koeficijenta proporcionalnosti od: a) temperature (za vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %) i d) vlažnosti (za temperaturu 20°C);**  
**merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno.**

a)

Koeficijent proporcionalnosti, <i>k</i>	Godine rada	Temperatura [°C]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	-5	6.21	6.37	7.43
		80	5.93	6.26	7.34
		150	4.64	4.85	5.50
	5	-5	5.52	5.84	6.79
		80	5.26	5.55	6.58
		150	5.04	5.31	6.23
	10	-5	5.25	5.45	6.65
		80	4.77	5.16	6.48
		150	4.56	4.97	6.01
15	-5	5.04	5.22	6.55	
	80	4.11	4.15	6.30	
	150	3.90	3.90	4.84	
20	-5	4.88	5.02	6.46	
	80	4.26	4.46	6.27	
	150	3.20	3.25	4.50	

b)

Koeficijent proporcionalnosti, <i>k</i>	Godine rada	Vreme [h]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	1	5.16	5.82	6.79
		2	4.92	5.63	6.73
		3	4.84	5.15	6.65
	5	1	4.21	4.99	6.53
		2	4.08	4.81	6.41
		3	3.86	4.85	6.43
	10	1	3.77	4.47	6.35
		2	3.59	4.34	6.23
		3	3.45	4.16	6.05
	15	1	3.15	3.93	5.86
		2	3.03	3.87	5.64
		3	2.96	3.54	5.37
	20	1	2.63	3.22	5.29
		2	2.56	3.06	5.04
3		2.37	2.86	4.81	

c)

Koefficient proporcionalnosti, $k$	Godine rada	Broj impulsa	Zona I	Zona II	Zona III
	0	100	6.97	6.96	7.22
		500	6.86	6.95	7.24
		1000	5.95	5.95	6.80
	5	100	6.39	6.47	6.46
		500	6.21	6.35	6.34
		1000	5.80	5.90	6.20
	10	100	5.62	6.05	6.18
		500	5.64	6.13	6.04
		1000	5.53	6.05	6.05
15	100	4.86	5.95	6.04	
	500	4.85	5.98	5.91	
	1000	4.00	4.10	4.92	
20	100	4.38	5.24	6.17	
	500	4.23	5.15	5.86	
	1000	3.90	4.01	5.20	

d)

Koefficient proporcionalnosti, $k$	Godine rada	Vlaga [%]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	20	6.82	7.03	7.33
		60	6.73	6.91	7.32
		90	6.75	6.97	7.27
	5	20	6.43	6.65	6.94
		60	6.38	6.49	6.76
		90	5.36	5.36	6.18
	10	20	6.03	6.43	6.36
		60	5.95	6.37	6.32
		90	5.12	5.22	6.10
	15	20	5.99	6.03	5.96
		60	5.73	5.92	5.85
		90	4.81	4.91	5.31
	20	20	5.37	5.87	5.24
		60	5.22	5.66	5.02
90		4.51	4.61	4.71	

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.8 vidi se da je vrednost koeficijenta  $k$  izolacije provodnika mala (manja od očekivane vrednosti, koja je za dobre izolatore bliska vrednosti 10, što je



nepovoljno za izolaciju). Najveći uticaj na dodatno smanjenje vrednosti koeficijenta proporcionalnosti ima temperatura, vreme izloženosti mehaničkom naprezanju i broj naprezanja impulsnim naponom. Vlaga ima mali uticaj na koeficijent proporcionalnosti. Ovakav rezultat se može objasniti termičkim diletacijama, mehaničkim oštećenjima izolacije provodnika i samog provodnika, tehnološkim postupkom izrade i mehaničkim naprezanjima. Oštećenje izolacije nastaje i usled naprezanja impulsnim naponom koje dovodi do efekta granjanja (treeing). Kao rezultat dolazi do pojave stvaranja slabih mesta na izolatoru provodnika koja smanjuju dielektričnu čvrstoću i olakšavaju proboj. Ovo objašnjenje potvrđuje činjenica da slučajna promenljiva „probojni napon“ nakon dužeg mehaničkog naprezanja i većeg broja naprezanja impulsnim naponom prelazi iz Gausove raspodele u troparametarsku Vejbulovu raspodelu.

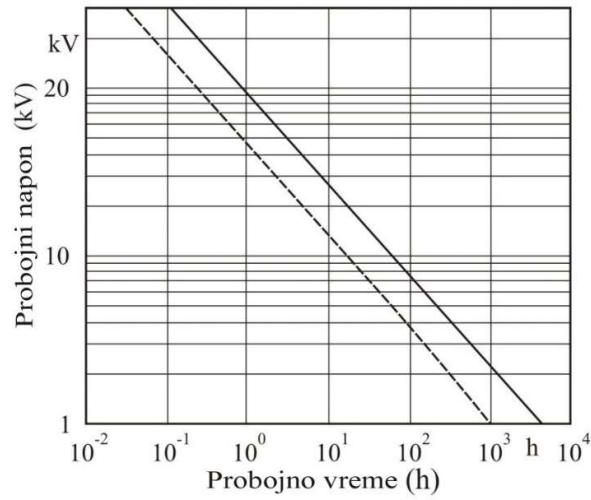
Kao i u slučaju uticaja pojedinačnih tipova naprezanja na indeks polarizacije (prikazani u tabeli 5.6), u tabeli 5.8 su prikazani efekti pojedinačnog naprezanja na koeficijent proporcionalnosti. Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 5.8 može se predvideti koja kombinacija posmatranih naprezanja može dovesti do najnegativnijeg sinergističkog efekta na izolaciju provodnika kanure. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 5.9.

**Tabela 5.9: Zavisnost koeficijenta proporcionalnosti od: sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom naprezanju, broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno.**

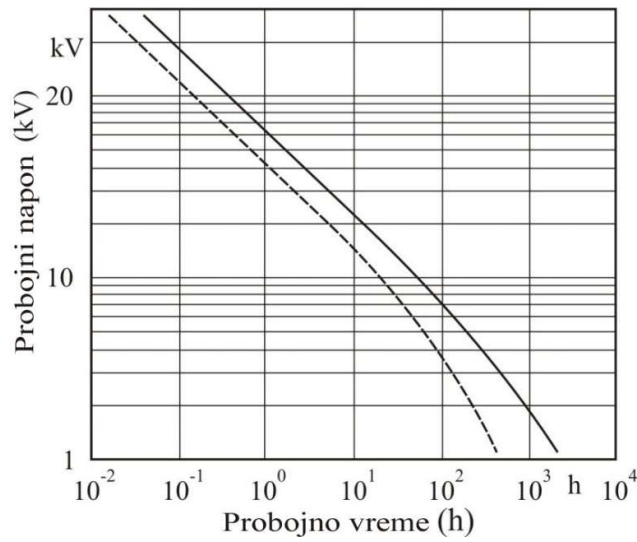
Godine rada	Temperatura [°C]	Vreme [h]	Broj impulsa	Vlaga [%]	s/Zona I	s/Zona II	s/Zona III
0	150	3	1000	90	4.81	4.82	6.51
5	150	3	1000	90	4.71	4.23	6.07
10	150	3	1000	90	3.12	4.10	5.44
15	150	3	1000	90	3.01	3.18	3.97
20	150	3	1000	90	2.95	2.98	3.34

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.9 je očigledno da efekti naprezanja na koeficijent proporcionalnosti nisu aditivni u kombinovanom naprezanju. Takođe se pokazuje da je smanjenje vrednosti koeficijenta  $k$  najveće na uzorcima iz zone I najduže korišćenih kanura uz dejstvo mehaničkog naprezanja i naprezanja impulsnim naponom (pojavom prenapona). Ovo je posledica oštećenja izolacije provodnika tehnološkim postupkom izrade, mehaničkim naprezanjem i pojavom lokalnih oštećenja (granjanja) izolacije impulsnim naponom. Sva ova oštećenja dovode do povećanja broja slabih mesta na izolaciji provodnika koja postaju izvori parcijalnog pražnjenja što povećava verovatnoću proboja. Ovo tumačenje potvrđuje i činjenica da statistička raspodela slučajnih veličina napon praga pražnjenja i probojni napon sa protokom vremena, mehaničkim naprezanjem i naprezanjem impulsnim naponom postaje sve više Vejbulovog tipa (što je posledica povećanja broja slabih mesta izolacije provodnika bez kompenzacije u nastanku jakih mesta što ima za posledicu asimetriju raspodele).

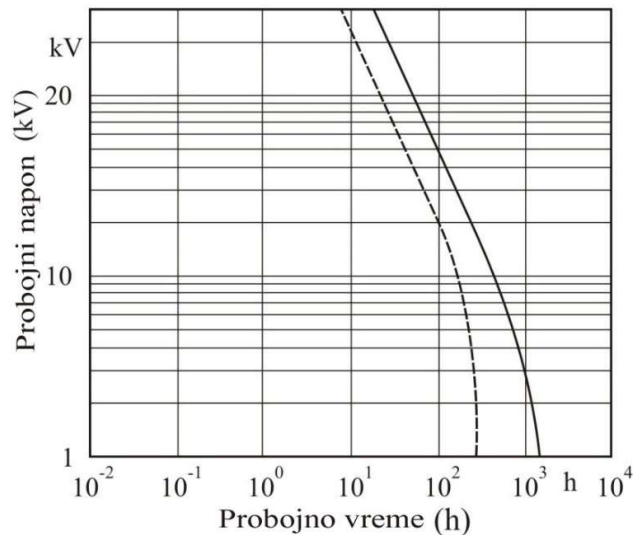
Na slici 5.29 prikazane su karakteristike 63 % kvantila životnog veka novih uzoraka i uzoraka uzetih koje su u pogonu provele 5 godina iz zone koje su uzete kao parametar, tj. prikazana je kriva životnog veka kojoj je pridružena verovatnoća 63 %. Ponašanje posmatranog sistema po ovoj karakteristici se može očekivati u 63 % slučajeva.



a)



b)



c)

Slika 5.29 - Karakteristike 63 % kvantila životnog veka određenih na osnovu merenja na uzorcima sa novih kanura — i uzoraka uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 5 godina - - - - : a) uzorak uzet sa zone III; b) uzorak uzet sa zone II; c) uzorak uzet sa zone I.

Karakteristike životnog veka prikazane na slici 5.29 pokazuju da izolacija provodnika u zoni III stari jedinstvenim mehanizmom i da se proces starenja ubrzava sa vremenom. Izolacija provodnika u zonama I i II ne stari jedinstvenim mehanizmom i proces starenja se ubrzava sa vremenom (brže nego u zoni III), što se zaključuje odstupanjem krive životnog veka od prave.

Kako parametri eksperimenta utiču na proces starenja izolacije provodnika najbolje se prikazuje preko njihovog uticaja na eksponent životnog veka. U tabeli 5.10 date su zavisnosti eksponenta životnog veka za uzorke uzete iz zona I, II i III novih i korišćenih kanura u zavisnosti od temperature, vremena trajanja mehaničkog naprezanja, broja naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona) i vlage.

**Tabela 5.10: Zavisnost eksponenta životnog veka od: a) temperature (za vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s (za temperaturu 20°C i vlažnost 20 %) i d) vlažnosti (za temperaturu 20°C); merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno.**

a)

Eksponent životnog veka, $r$	Godine rada	Temperatura [°C]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	-5	10.43	11.81	12.22
		80	9.37	9.73	12.03
		150	7.14	7.18	11.87
	5	-5	8.21	8.45	11.92
		80	6.14	6.01	11.05
		150	6.98	7.17	9.06
	10	-5	7.07	7.03	10.03
		80	6.18	6.19	9.76
		150	5.01	5.10	8.21
15	-5	5.59	5.94	9.24	
	80	5.95	5.93	8.25	
	150	4.33	4.35	9.06	
20	-5	5.05	5.27	8.90	
	80	4.01	4.05	7.10	
	150	3.81	3.83	6.72	

b)

Eksponent životnog veka, $r$	Godine rada	Vreme [h]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	1	10.26	11.73	12.16
		2	10.05	11.68	12.04
		3	9.82	11.60	11.83
	5	1	9.28	10.84	11.87
		2	8.96	10.74	11.59
		3	8.73	10.55	11.41
	10	1	8.49	9.89	11.72
		2	8.28	9.62	11.45
		3	8.05	9.33	11.22
	15	1	7.23	8.39	10.95
		2	7.06	8.03	10.73
3		6.93	7.95	10.57	
20	1	5.95	7.81	10.04	
	2	5.75	7.54	9.83	
	3	5.27	7.37	9.52	

c)

EkspONENT ŽIVOTNOG VEKA, $r$	Godine rada	Broj impulsa	Zona I	Zona II	Zona III
	0	100	10.03	11.42	12.42
		500	9.94	9.93	12.24
		1000	9.84	9.75	11.91
	5	100	9.06	9.53	11.86
		500	8.92	9.13	11.75
		1000	8.74	8.90	11.78
	10	100	7.91	8.73	11.54
		500	7.56	8.51	11.07
		1000	7.25	7.92	10.84
15	100	7.07	7.61	10.66	
	500	6.84	7.36	10.62	
	1000	6.33	7.06	10.28	
20	100	6.07	6.97	10.05	
	500	5.87	6.78	9.88	
	1000	5.14	6.53	9.79	

d)

EkspONENT ŽIVOTNOG VEKA, $r$	Godine rada	Vlaga [%]	Zona I	Zona II	Zona III
	0	20	10.44	11.85	12.50
		60	10.23	11.46	12.35
		90	10.05	11.02	12.02
	5	20	8.92	10.45	11.83
		60	8.78	10.29	11.77
		90	8.45	10.04	11.49
	10	20	7.86	9.72	10.87
		60	7.49	9.58	10.54
		90	6.28	8.26	10.42
	15	20	6.91	9.07	10.03
		60	6.72	8.85	9.76
90		5.34	5.06	9.84	
20	20	5.95	6.44	9.26	
	60	5.63	6.12	8.96	
	90	4.61	4.95	8.17	

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.10 vidi se da je vrednost eksponenta životnog veka samo u zoni III kanure u skladu sa očekivanom vrednošću  $\sim 12$  [38]. Razlike u vrednosti eksponenta

životnog veka po zonama kanure su znatne što pokazuje da tehnološki postupak znatno utiče na starenje kanure i to najviše u zoni I, a najmanje u zoni III. Od ispitivanih napreznja na eksponent životnog veka najviše utiče temperatura (u smislu smanjenja njegove vrednosti, tj. smanjenja životnog veka odnosno ubrzanja procesa starenja). Pored temperature značajan uticaj na koeficijent životnog veka ima i mehaničko napreznje, a ni uticaj vlage se ne može zanemariti. Uticaji mehaničkog napreznja i izloženosti impulsnim naponima (pojavi prenapona tokom eksploatacije) su nešto manji, ali nisu zanemarljivi. Svi ovi uticaji su najizraženiji u zoni I, a najmanje izraženi u zoni III. Takođe, što su kanure duže korišćene, uticaji svih tipova napreznja i tehnološkog procesa su izraženiji (na osnovu svih tabela je jasno da pri istim uslovima i za sve posmatrane zone kanure eksponent životnog veka opada za sve posmatrane parametre eksperimenta uz određene, male statističke varijacije). Ovi rezultati se mogu objasniti na sledeći način: 1 – povišena temperatura podržava hemijske procese starenja koji su u zoni III jedinstvene prirode; 2 – vlaga takođe podržava hemijske procese starenja; 3 – mehaničko napreznje i napreznje impulsnim naponom povećavaju broj slabih mesta izolacije na kojima se javlja parcijalno pražnjenje. Intenzivnije parcijalno pražnjenje se javlja u zonama I i II što između ostalog dovodi do efekta hemijskog starenja višeg reda.

Kao i u prethodnim slučajevima na osnovu podataka iz tabele 5.10 može se predvideti koja kombinacija posmatranih napreznja može dovesti do najgoreg slučaja sinergističkog efekta na izolaciju provodnika kanure. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 5.11:

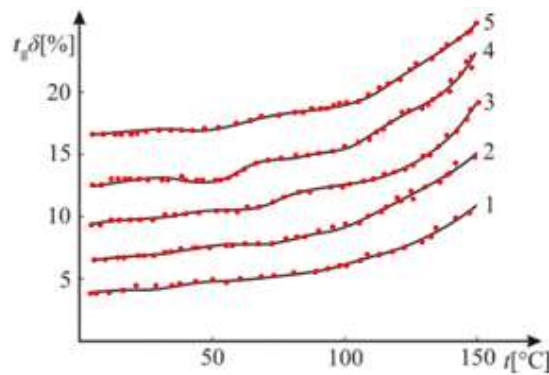
**Tabela 5.11: Zavisnost eksponenta životnog veka od: sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom napreznju, broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima merenih na uzorcima uzetih sa zona I, II i III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina, respektivno.**

Godine rada	Temperatura [°C]	Vreme [h]	Broj impulsa	Vlaga [%]	s/Zona I	s/Zona II	s/Zona III
0	150	3	1000	90	7.95	8.39	12.17
5	150	3	1000	90	5.67	5.86	8.96
10	150	3	1000	90	4.81	5.04	8.64
15	150	3	1000	90	3.05	3.10	8.15
20	150	3	1000	90	2.94	2.52	5.34

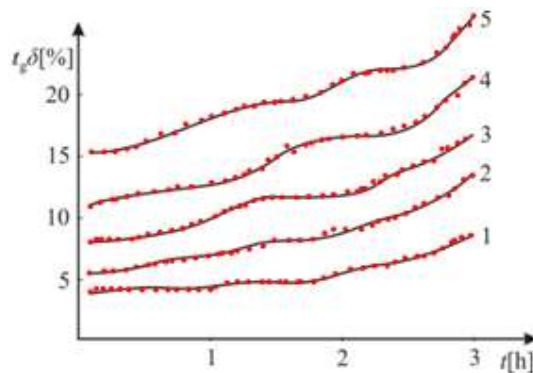
Na osnovu tabele 5.11 je jasno da efekti sinergije na eksponent nisu aditivni, ali da se javljaju u znatnoj meri. Naime, ako se uzmu vrednosti eksponenta životnog veka bilo koje kolone iz tabele 5.11 i uporede sa odgovarajućim vrednostima eksponenta životnog veka iz tabele 5.10 dobijaju se nešto niže vrednosti koje se ne mogu prikazati sa odgovarajućim vrednostima eksponenta životnog veka iz tabele 5.10. Pošto su vrednosti u tabeli 5.11 niže vrednosti, može se reći da sinergija postoji, da nije drastična i da nije negativna. Može se zaključiti da je smanjenje eksponenta životnog veka najveće u zoni I kanure pri visokim temperaturama, povišenoj vlažnosti i pojavama prenapona (napreznja impulsnim naponima) u slučaju uzoraka uzetih sa kanura koje su u pogonu provele dugo vremena. Međutim, i u slučaju uzoraka uzetih sa zone III dolazi do značajnog opadanja vrednosti eksponenta životnog veka pod istim uslovima. Kao što je i očekivano eksponent životnog veka ima

najvišu vrednost u slučaju novih kanura, ali se i u tom slučaju javlja razlika u zavisnosti iz koje je zone uzet uzorak.

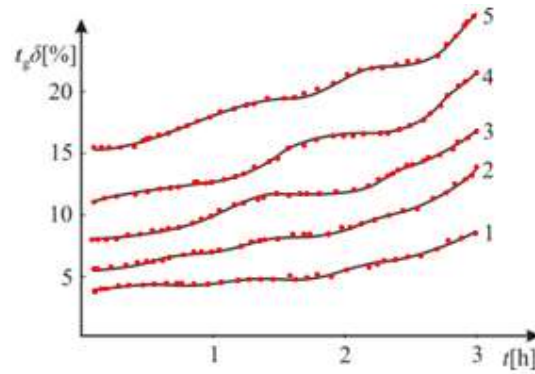
Na slici 5.30 prikazana je zavisnost  $tg\delta$  od temperature za nove i kanure uzete koje su u pogonu provele tačan broj godina. Na slici 5.31 je prikazana zavisnost  $tg\delta$  od vremena trajanja mehaničkih napreznja novih i kanura koje su u pogonu provele tačno određeni broj godina. Na slici 5.32 je prikazana zavisnost  $tg\delta$  novih i korišćenih kanura od broja napreznja impulsnim naponom  $1.2/50 \mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona). Na slici 5.33 je prikazana zavisnost otpora izolacije  $R_1$  novih i k kanura koje su u pogonu provele tačan broj godina, od temperature. Na slici 5.34 prikazana je zavisnost napona praga parcijalnog pražnjenja od vremena novih i kanura koje su u pogonu provele tačan broj godina uz jednosatno mehaničko napreznje i 1000 napreznja impulsnim naponom  $1.2/50 \mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona) kao parametre. Na slici 5.35 prikazana je zavisnost probojnog napona od vremena novih i kanura koje su u pogonu provele tačan broj godina uz jednosatno mehaničko napreznje i 1000 napreznja impulsnim naponom  $1.2/50 \mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona) kao parametre. Na slici 5.36 prikazan je histogram statističkog uzorka slučajne promenljive „probojni napon“ novih kanura i kanura koje su u pogonu provele tačan broj godina. Na slici 5.37 prikazane su karakteristike životnog veka novih i korišćenih kanura.



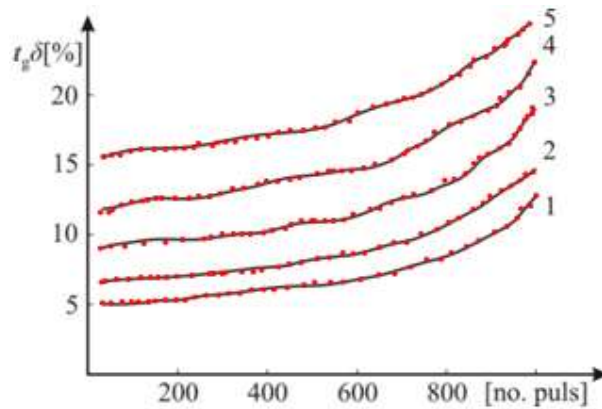
Slika 5.30 - Zavisnost  $tg\delta$  od temperature: 1 – novih kanura, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina.



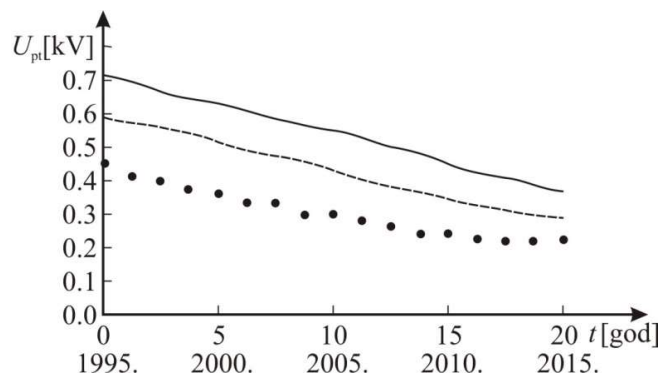
Slika 5.31 - Zavisnost  $tg\delta$  od vremena trajanja mehaničkog napreznja: 1 – nove kanure, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina.



Slika 5.32 - Zavisnost  $tg\delta$  od broja napreznja impulsnim naponom 1.2/50  $\mu s$  (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog  $ac$  napona): 1 – novih kanura, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina.

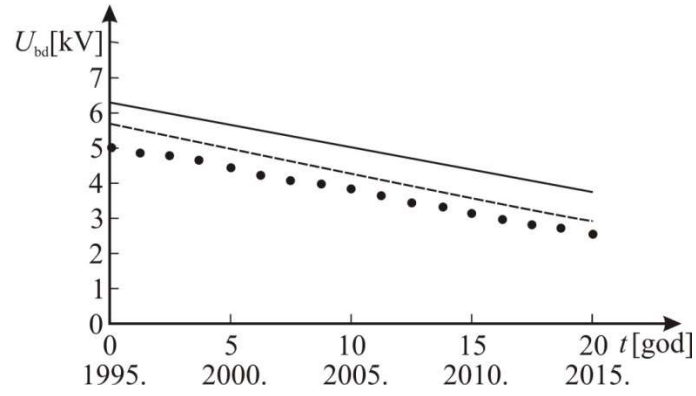


Slika 5.33 - Zavisnost otpora izolacije  $R_1$  od temperature: 1 – novih kanura, 2 – kanura koja je u pogonu provela 5 godina, 3 – kanura koja je u pogonu provela 10 godina, 4 – kanura koja je u pogonu provela 15 godina, 5 – kanura koja je u pogonu provela 20 godina.

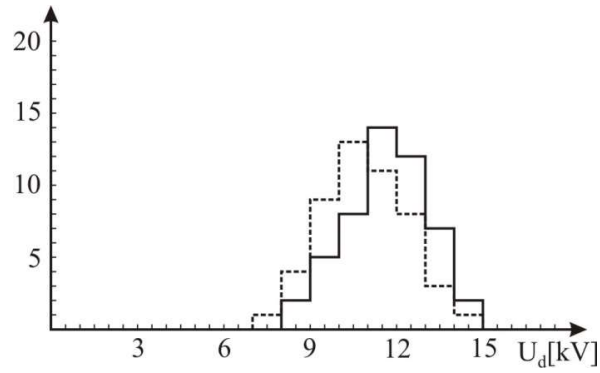


Slika 5.34 - Zavisnost napona praga parcijalnog pražnjenja od vremena, kanura koje su provele u pogonu 0, 5, 10, 15 i 20 godina: — bez napreznja, - - - - jednosatno mehaničko napreznje i •••• 1000 napreznja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog  $ac$  napona).

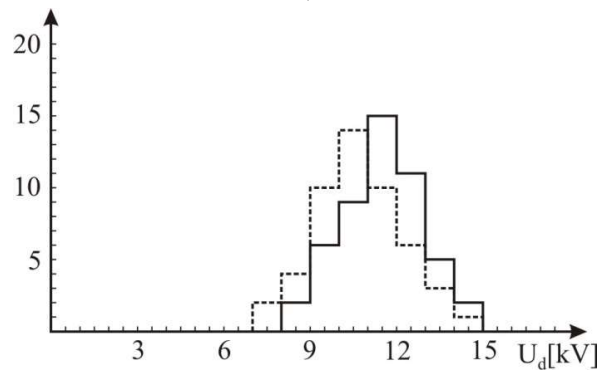




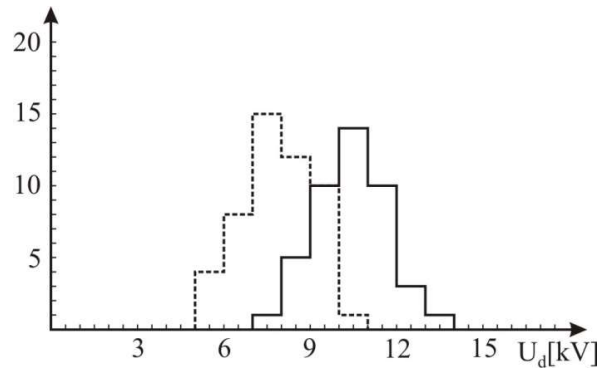
Slika 5.35 - Zavisnost probojnog napona od vremena, kanura koje su provele u pogonu 0, 5, 10, 15 i 20 godina: — bez naprezanja, - - - jednosatno mehaničko naprezanje i •••• 1000 naprezanja impulsnim naponom (amplitude 25 % veće od amplitude nominalnog *ac* napona).



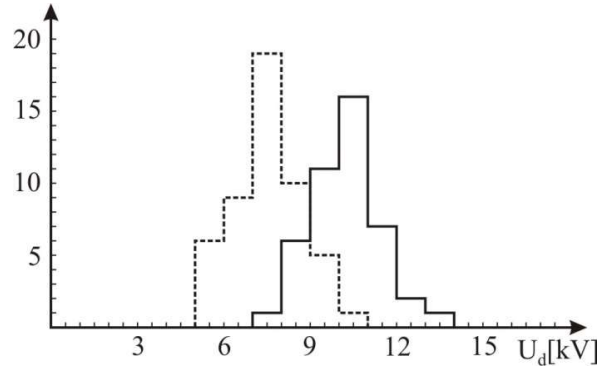
a)



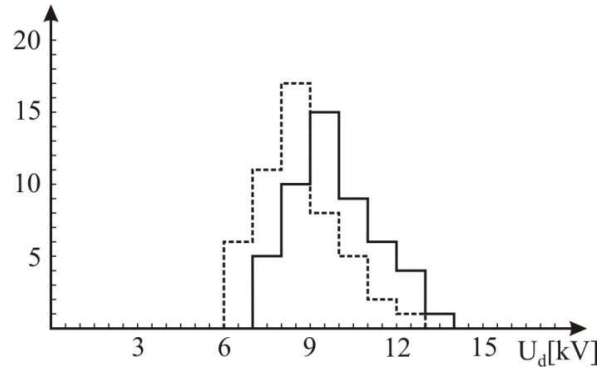
b)



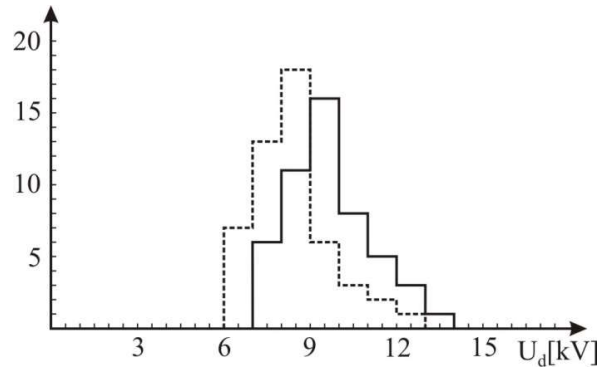
c)



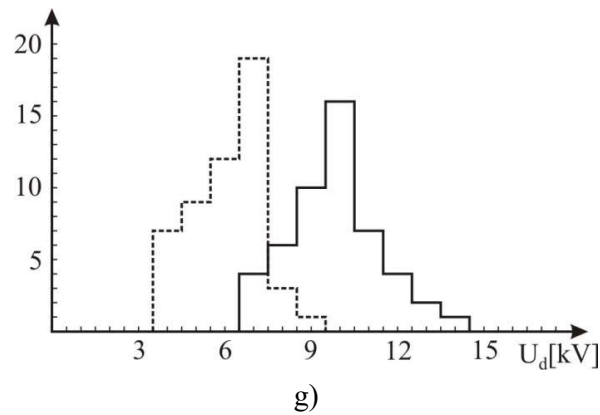
d)



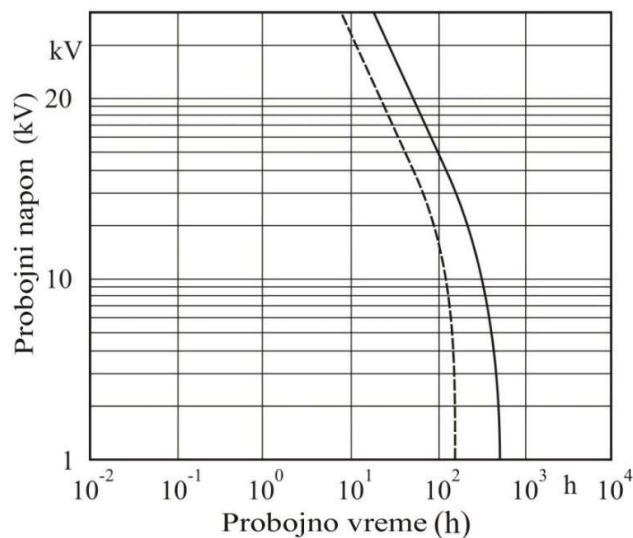
e)



f)



Slika 5.36 - Histogrami (klase  $1+3.3\log n$ ;  $n$  – veličina statističkog uzorka) slučajne promenljive  $ac$  probojnog napona — uzoraka nove kanure i - - - - uzoraka uzetih sa kanure koja je provela u pogonu 10 godina: a) zona II; b) zona II, 1000 napreznja impulsnim naponom; c) zona II, 3 sata mehaničkog napreznja i vlaga; d) zona II, 90°C temperatursko napreznje i 1000 napreznja impulsnim naponom; e) zona II, 90 % vlaga i 3 sata mehaničko napreznje; f) zona II, 1000 napreznja impulsnim naponom; g) zona II, 3 sata mehaničkog napreznja, 1000 napreznja impulsnim naponom i 90 % vlaga.



Slika 5.37 - Karakteristike 63 % kvantila životnog veka novih kanura — i kanura koje su provele u pogonu 5 godina - - - -.

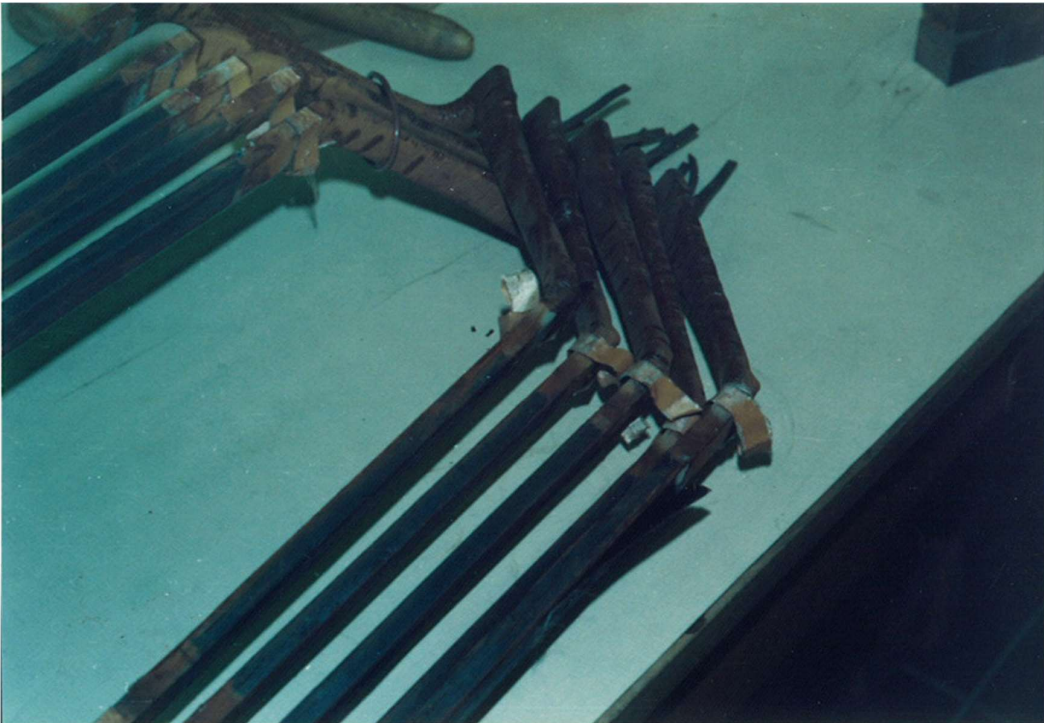
Na osnovu rezultata prikazanim na slikama 5.30 – 5.37 može se zaključiti da je ponašanje izolacije provodnika novih i kanura koje su u pogonu provele tačan broj godina određeno ponašanjem izolacije u glavi (zona I) kanure. To je očigledno na osnovu činjenice da se parametri izolacije provodnika kanure ( $tg\delta$ ,  $R_1$ , napon praga parcijalnog pražnjenja,...) kvalitativno ponašaju identično kao odgovarajući parametri dobijeni sa uzorcima uzetih iz zone I novih i korišćenih kanura.

To potvrđuju fotografije kanura na slici 5.38. Sa fotografija na slici 5.38 se vidi da oštećenja korišćenih kanura nastaju, uglavnom u zonama I i II (i na prelazu iz zone I u zonu III). Takođe se vidi da je za kanure koje su u pogonu provele 20 godina (slika 5.38a) i kanure koje su u pogonu provele 15 godina (slika 5.38b) došlo do raslojavanja, a kod kanura koje su u pogonu provele 5 godina nije došlo do raslojavanja već samo do proboja u oblasti prelaska iz zone II u zonu III. Sa slika 5.38 se vidi da je nakon 15 i 20 godina korišćenja došlo do oštećenja izolacije u oblasti I i II i da su se pojavili

otvori u izolaciji koji mogu da propuštaju vlagu i druge čestice u izolacioni sistem (što izaziva i raslojavanja u zoni III, slika 5.38b) – gornja kanura).



a)



b)



c)

Slika 5.38 - Fotografije oblasti kanura u kojima je došlo do oštećenja usled električnog proboja, zone I, zone II i prelaza između zone II i zone III kanura koje su u pogonu provele:

a) 5 godina; b) 15 godina i c) 20 godina.

U kvantitativnom pogledu vrednosti parametara izolacije provodnika novih kanura i kanura koje su u pogonu provele 5, 10, 15 i 20 godina su nešto slabije u izolacionom pogledu od odgovarajućih vrednosti dobijenih za uzorke uzete sa zone III novih kanura i kanura koje su u pogonu provele tačan broj godina. Tačnost ovog opažanja potvrđuje poređenje podataka o zavisnosti indeksa polarizacije, koeficijenta proporcionalnosti i eksponenta životnog veka novih kanura i kanura koje su u pogonu provele tačan broj godina od tipa naprežanja (tabela 5.12) i od kombinovanog naprežanja (tabela 5.13) sa odgovarajućim rezultatima prikazanim u tabelama 5.6 – 5.11.

**Tabela 5.12: Zavisnost indeksa polarizacije, koeficijenta proporcionalnosti i eksponenta životnog veka novih kanura i kanura koje su provele u pogonu 5, 10, 15 i 20 godina respektivno, od: a) temperature (vlažnost 20 %); b) vremena izloženosti mehaničkom naprezanju (temperatura 20°C, vlažnost 20 %); c) broja impulsnih opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s (temperatura 20°C, vlažnost 20 %); d) vlažnosti (temperatura 20°C)**

a)

Godine rada	Temperatura [°C]	s	k	r
0	-5	2.63	5.60	9.30
	80	2.48	3.29	8.61
	150	3.51	5.14	7.62
5	-5	2.47	5.01	7.63
	80	3.32	4.82	5.92
	150	3.16	4.51	6.21
10	-5	2.53	4.48	6.01
	80	2.09	3.22	4.61
	150	3.04	4.03	5.18
15	-5	2.34	4.50	5.01
	80	1.92	2.98	3.83
	150	2.22	3.42	4.72
20	-5	2.69	4.35	4.48
	80	2.57	4.76	4.28
	150	2.53	4.61	3.82

b)

Godine rada	Vreme [h]	s	k	r
0	1	3.24	4.53	9.10
	2	3.17	4.48	9.00
	3	3.10	4.47	8.70
5	1	2.95	3.81	8.30
	2	2.91	3.60	8.10
	3	2.82	3.53	7.60
10	1	2.73	3.52	7.40
	2	2.71	3.29	7.30
	3	2.60	3.00	7.20
15	1	2.57	2.71	6.50
	2	2.56	2.61	6.30
	3	2.50	2.31	6.25
20	1	2.43	2.28	5.31
	2	2.34	2.15	5.16
	3	2.23	2.08	4.68

c)

Godine rada	Broj impulsa	s	k	r
0	100	3.28	6.31	6.18
	500	3.11	6.22	6.12
	1000	2.92	6.23	6.12
5	100	3.11	5.71	5.82
	500	2.98	5.72	5.71
	1000	2.88	5.12	5.71
10	100	2.81	5.12	5.43
	500	2.63	5.10	5.40
	1000	2.60	5.28	5.40
15	100	2.58	5.28	5.39
	500	2.50	5.28	5.38
	1000	2.48	3.87	5.34
20	100	2.43	3.86	5.12
	500	2.38	3.84	4.81
	1000	2.31	3.83	4.72

d)

Godine rada	Vlaga [%]	s	k	r
0	20	3.81	6.20	9.20
	60	3.61	6.10	9.10
	90	3.28	6.10	9.00
5	20	3.51	6.00	8.12
	60	3.31	5.70	7.95
	90	3.08	5.71	7.41
10	20	3.41	5.71	7.00
	60	3.18	5.40	6.68
	90	3.60	5.39	6.51
15	20	2.91	5.40	6.21
	60	2.12	5.39	6.10
	90	2.05	5.39	5.61
20	20	2.62	5.37	5.50
	60	2.32	5.10	5.10
	90	2.20	5.08	4.99

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.12 vidi se da se indeks polarizacije, koeficijent proporcionalnosti i eksponent životnog veka novih i korišćenih kanura ponašaju kao i uzorci uzeti iz

zone I odgovarajuće kanure. U kvantitativnom pogledu dolazi do određenih razlika. Naime, vrednosti indeksa polarizacije, koeficijenta proporcionalnosti i eksponenta životnog veka u slučaju celih kanura imaju (pod istim uslovima) za oko 10 % niže vrednosti od odgovarajućih vrednosti uzoraka uzetih iz kanure. U nekim kritičnim slučajevima to smanjenje od 10 % uvodi izolacione karakteristike ispod dozvoljene vrednosti. Ovo snižavanje vrednosti indeksa polarizacije, koeficijenta proporcionalnosti i eksponenta životnog veka se može objasniti efektom porasta verovatnoće električnog pražnjenja.

**Tabela 5.13: Zavisnost indeksa polarizacije, koeficijenta proporcionalnosti i eksponenta životnog veka novih kanura i kanura koje su provele u pogonu 5, 10, 15 i 20 godina respektivno, od sinergističnog delovanja temperature, vremena izloženosti mehaničkom napreznju, broja impulsa opterećenja naponom oblika 1.2/50  $\mu$ s i vlažnosti u najgorim slučajevima**

Godine rada	Temperatura [°C]	Vreme [h]	Broj impulsa	Vlaga [%]	s	k	r
0	-5	3	1000	90		5.41	
	150				2.87	6.52	
5	-5	3	1000	90		4.21	
	150				2.43	2.95	
10	-5	3	1000	90		3.84	
	150				2.15	2.95	
15	-5	3	1000	90		3.61	
	150				2.08	2.34	
20	-5	3	1000	90		3.59	
	150				1.98	2.11	

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.13 vidi se da sinergija efekata kombinovanog napreznja na indeks polarizacije, koeficijent proporcionalnosti i eksponent životnog veka nije aditivna, ali da se javlja u značajnoj meri. Poređenjem rezultata prikazanih u tabeli 5.13 sa rezultatima prikazanim u tabelama 5.10 - 5.12 uočava se da uticaj tehnologije proizvodnje, vreme korišćenja i kombinovano napreznje kanure ima isto kvalitativno ponašanje kao isti uticaji na uzorak uzet iz zone I kanure. U kvantitativnom pogledu rezultati za celu kanuru su za oko 10 % lošiji od odgovarajućih rezultata dobijenih na uzorcima (što se objašnjava efektom zakona povećanja verovatnoće). U slučaju kanura korišćenih 20 godina ispitivani parametri su, često, kritične vrednosti ili slabiji. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da temperatura, mehaničko napreznje i pojava parcijalnog pražnjenja najviše utiču na skraćivanje radnog veka obrtne električne mašine. Njihov uticaj naročito dolazi do izražaja u sinergiji. Tumačenje za to bi moglo biti da temperatura, koja nesporno ima dominantan uticaj u destrukciji izolacije putem diletacije provodnika i pospešenjem hemijskih procesa u izolaciji, dovodi do slabljenja pakovanja kanure (naročito na prelazima iz zone II u zonu III). Mehaničke oscilacije tako oslabljeno pakovanje rastresu što dovodi do raslojavanja. U nastale pukotine ulazi vlaga sa nečistoćama što povećava verovatnoću i intenzitet parcijalnog pražnjenja, koje konačno vodi proboju.

#### 5.4. Efekat radioaktivnog zračenja na starenje izolacionog sistema

U prethodnom delu ispitivanja proveravao se predloženi algoritam za brzu, tačnu i pouzdanu procenu preostalog životnog veka izolacionog sistema obrtne električne mašine u uslovima kombinovanog, sekundarnog napreznja utvrđivanjem karakteristike veka trajanja. Na osnovu dobijenih rezultata, algoritam predložen u radu je verifikovan i predložena je moguća hijerarhija



sinergije naprezanja koja vodi nultoj vrednosti preostalog životnog veka. Prilikom postupaka analize dejstva raznih tipova naprezanja, pojedinačnoj i u sinergičkoj sprezi, naglašeno je da su izvedeni primeri opšteg karaktera, a da za rad obrtne električne mašine u specijalnim uslovima treba izvršiti dopunska ispitivanja predloženim algoritmom koji je, prema načinu izvođenja, univerzalno validiran ali treba uzeti u obzir i specifikume tih specijalnih naprezanja.

Specijalna naprezanja kojima se obrtna električna mašina ispituje na starenje primenom karakteristike veka trajanja u ovom radu je dejstvo polja gama i neutronskog zračenja na karakteristiku životnog veka. Dejstvo polja gama i neutronskog zračenja na stabilnost rada i dužinu životnog veka obrtne električne mašine nije problem naučno špekulativne prirode već stvarni problem povezan sa povećanjem pouzdanosti rada nuklearno-energetskih (i istraživačkih) postrojenja. Ovde treba naglasiti da su izdvojena gama i neutronska polja iz razloga njihove, skoro, neograničene prodornosti (neutroni su neutralne čestice sa masom, pa sa materijom intereaguju isključivo mehaničkim sudarima i mogu se zaustaviti efikasno kombinovanim preprekama vode za termalizaciju i pločama kadmijuma koji imaju visoki efikasni presek za apsorpciju termalnih neutron, dok je gama zračenje elektromagnetno jonizujuće zračenje koje, delimično, zaustavljaju samo izuzetno debeli slojevi olova, odnosno teških elemenata). [55, 63]

#### 5.4.1. Uticaj polja gama zračenja na stabilnost rada i dužinu životnog veka izolacionog sistema

Ispitivanje uticaja gama polja na starenje izolacione strukture statora obrtne električne mašine uglavnom su bila usredsređena na lak-staklo-staklo-lak izolaciju oznake LGGL (*lacquer-glass-glass-lacquer*), algoritmom predloženim u ovom radu. Uzorci za ispitivanje su vršeni na način predložen algoritmom iz zona I, II i III kanura istog tipa kao onih kojima je eksperimentisano u prethodnim poglavljima kada je ispitivana validacija predloženog algoritma. Iz kanura uzetih sa statora obrtne električne mašine izrađeni su uzorci za ispitivanje u dovoljnom broju da se na njih primeni u potpunosti predloženi algoritam za određivanje preostalog životnog veka izolacionog sistema obrtne električne mašine sa statističkom nesigurnošću 5%. Statistička usklađenost korišćenih uzoraka utvrđena je merenjem slučajnih promenljivih za svaki uzorak i odbacivanjem onih uzoraka koji su se od drugih odgovarajućih uzoraka u pogledu te posmatrane slučajne promenljive razlikovali za preko 5% (što je malo ličilo na pojednostavljeni Šoveneov kriterijum).

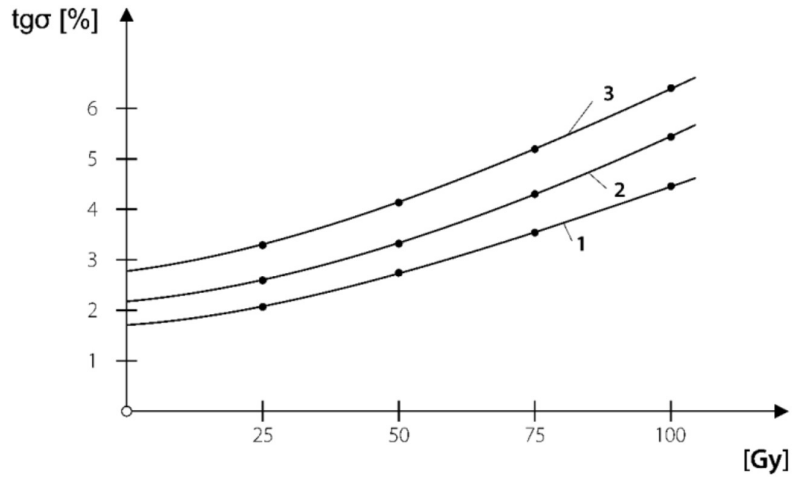
Uvođenje ispitanih uzoraka vršeno je u Sekundarnoj standardnoj dozimetrijskoj laboratoriji Instituta za nuklearne nauke „Vinča“. Polje gama zračenja je bilo kolimisano. Izvor Co-60 je bio aktivnosti 20 TBq na dan vršenje eksperimenta. Energija fotona nosilaca polja gama zračenja je bila oko 1,25 MeV. Sekundarni standard sledljivo do BIPM (International Bureau of Weights and Measures) je korišćen za određivanje referentnih vrednosti u vazduhu sa mernom nesigurnošću 1%.

Sekundarni standard je zajedno sa ozračenim uzorcima laserski pozicioniran u snop pomoću centralnih i lateralnih lasera. Uzorci su se nalazili na 64 cm od izvora. PMMA ploča debljine 4 mm je služila za formiranje sekundarne električne ravnoteže. Jačina doze u polju gama zračenja je bila 264 mGy/min. Uzorci su primili dozu između 25 Gy i 100 Gy.

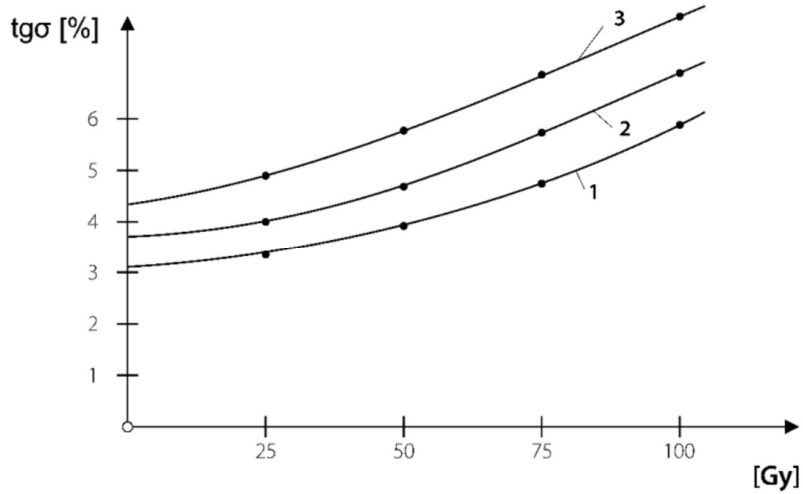
#### 5.4.2. Rezultati i diskusija uticaja gama zračenja na preostali životni vek i druge karakteristike izolacionog sistema

Na slici 5.39 prikazana je zavisnost tangensa ugla od primljene doze gama zračenja za uzorke iz svih zona kanura (zona I, zona II i zona III) za napon pri kome je određivana vrednost  $tg\delta$  parametar. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.39 pokazan je znatan uticaj primljene doze gama zračenja na prethodne u LGGL izolaciji. Slike 5.39 a), b) i c) jasno pokazuju da postoji sinergija između doze zračenja i tehnološkog postupka izrade navoja. U stvari uočljivo je da prvi izvod krive funkcionalne zavisnosti  $tg\delta$  od doze najveći u slučaju uzoraka preuzetih iz zone I navoja, nešto manji kada je uzorak uzet iz zone II, a skoro zanemarljiv za uzorke uzete iz zone III. Ovo se objašnjava kao posledica znatnog mehaničkog naprezanja LGGL izolacije prilikom tehnološkog postupka izrade

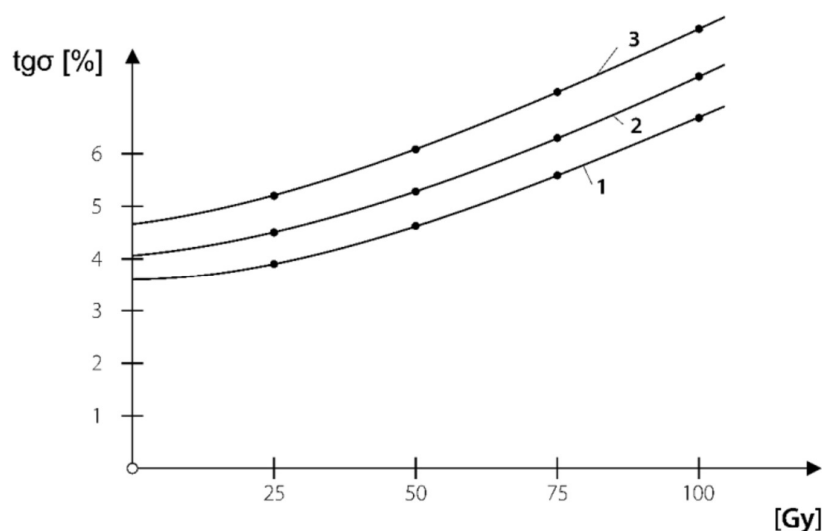
zone I kanure, kao i za zonu II (nešto je manje naprezanje, ali svakako nije zanemarljivo). Naprezanje je u potpunosti zanemarljivo prilikom formiranja zone III. Ta naprezanja prilikom tehnološkog postupka izrade kanure dovode do naprezanja molekularne strukture što povećava mogućnost njenog oštećenjs usled deponovanja energije gama zračenja. Zavisnost tangensa ugla gubitaka od napona pri kome je vršeno merenje je više nego jasno.



a)



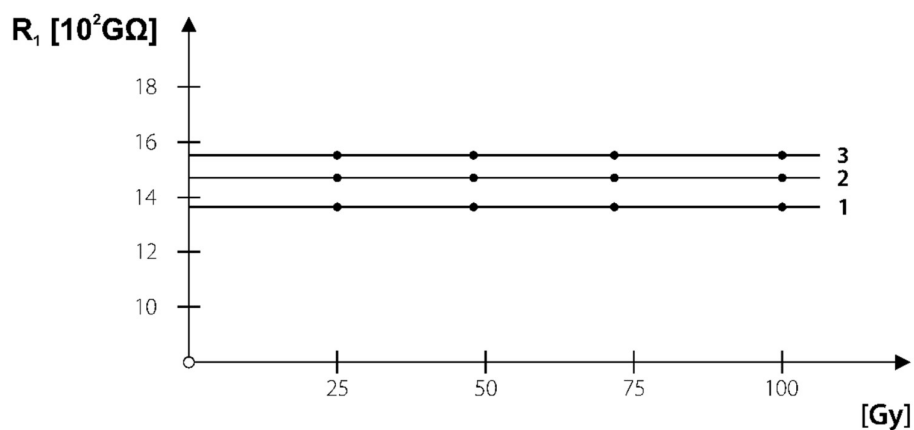
b)



c)

Slika 5.39 - Zavisnost tangensa ugla gubitaka ( $\text{tg}\delta$ ) od primljene doze; 1- napon 1.2 kV, 2- napon 4.2kV, 3- napon 6kV: a) uzorak iz zone III navoja, b) uzorak iz zone II navoja i c) uzorak iz zone I navoja. [55]

Na slici 5.40 prikazan je promena otpornosti LGGL izolacije  $R_1$  (merene 1 minut nakon startovanja obrtne električne mašine) u zavisnosti od doze gama zračenja za uzorke uzete iz zone I, II i III kanure.

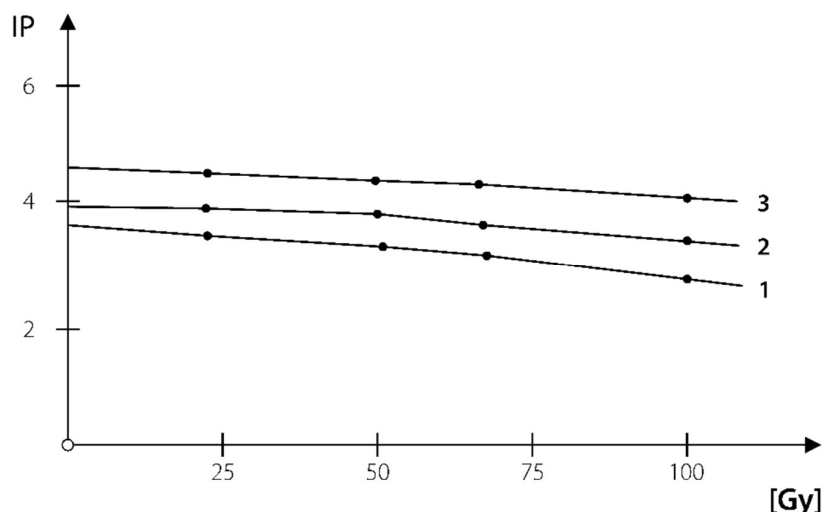


Slika 5.40 - Zavisnost otpora  $R_1$  od primljene doze; 1-uzorak uzet iz zone I navoja; 2-uzorak uzet iz zone II navoja i 3-uzorak uzet iz zone III navoja. [55]

Na osnovu slike 5.40 se može konstatovati da otpornost svih uzoraka veoma polako raste ka višim vrednostima sa povećanjem doze gama zračenja. Isto tako se može konstatovati da je otpornost uzorka uzetog iz zone I najmanja. Ovo se može smatrati posledicom tehnološkog postupka izrade kanure. Naime, prilikom izrade kanure, u zonama I i II dolazi do mehaničkih naprezanja koja dovode do mikro naprslina na izolacionoj traci. Porast, doduše blagi, otpornosti LGGL izolacije sa apsorbovanom dozom gama zračenja nastaje usled mikrooštećenja koje gama zračenje stvara u izolacionom sistemu. Ovakva mikrooštećenja zahvataju slobodne elektrone (kojih ima izuzetno malo) i to dovodi do konstatovanog efekta.

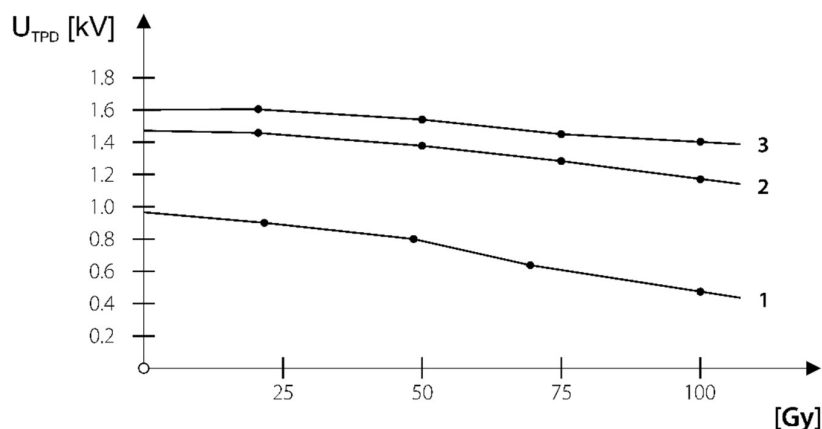
Način na koji primljena doza gama zračenja utiče na LGGL izolaciju najbolje pokazuje zavisnost indeksa polarizacije od primljene doze gama zračenja uzoraka iz zone I, II i III kanure, slika

5.41. Na osnovu slike 5.41 se vidi da dolazi do uočljivog opadanja indeksa polarizacije sa porastom doze gama zračenja. To je usled opadanja otpornosti  $R_{10}$  i istovremenog porasta otpornosti  $R_1$  sa porastom doze gama zračenja. Naime, protokom 10 minuta dejstva električnog polja na LGGL izolator dešava se izvlačenje slobodnih elektrona iz defekata nastalih gama zračenjem. Iz tog razloga dolazi do pada vrednosti otpornosti  $R_{10}$  pošto se slobodni elektroni vraćaju u izolator pri čemu sam broj opterećenja raste. Kao što je napomenuto otpornost  $R_1$  raste sa porastom doze gama zračenja, količnik  $R_{10}/R_1$  (predstavlja indeks polarizacije) brzo opada kako električni proboj izolacije provodnika izaziva uništenje kanure te ta promena može da se očekuje i uz blagovremeno sprečavanje ove promene može da se omogući duži životni vek obrtne električne mašine.



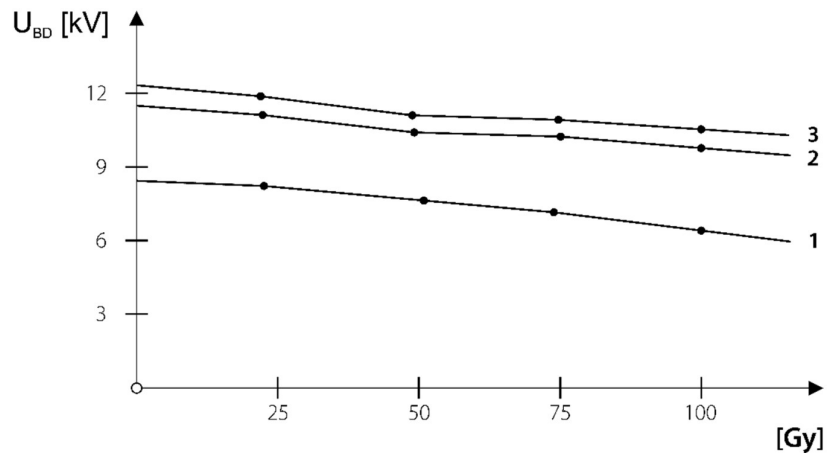
Slika 5.41 - Indeks polarizacije u zavisnosti od primljene doze zračenja; 1-uzorak uzet iz zone I navoja, 2-uzorak uzet iz zone II navoja i 3-uzorak uzet iz zone III navoja. [55]

U cilju nedestruktivne detekcije mogućeg proboja LGGL izolacije potrebno je redovno pratiti parcijalno pražnjenje na izolaciji LGGL i poznavati korelacioni odnos između vrednosti probijenog napona. Na slici 5.42 prikazana je funkcionalna zavisnost praga parcijalnog pražnjenja LGGL izolacije i dobijene doze gama zračenja za uzorke uzete iz zona I, II i III kanura.



Slika 5.42 - Zavisnost ac napona praga parcijalnog pražnjenja od primljene doze  $\gamma$  zračenja: 1-zona I navoja, 2-zona II navoja i 3-zona III navoja. [55]

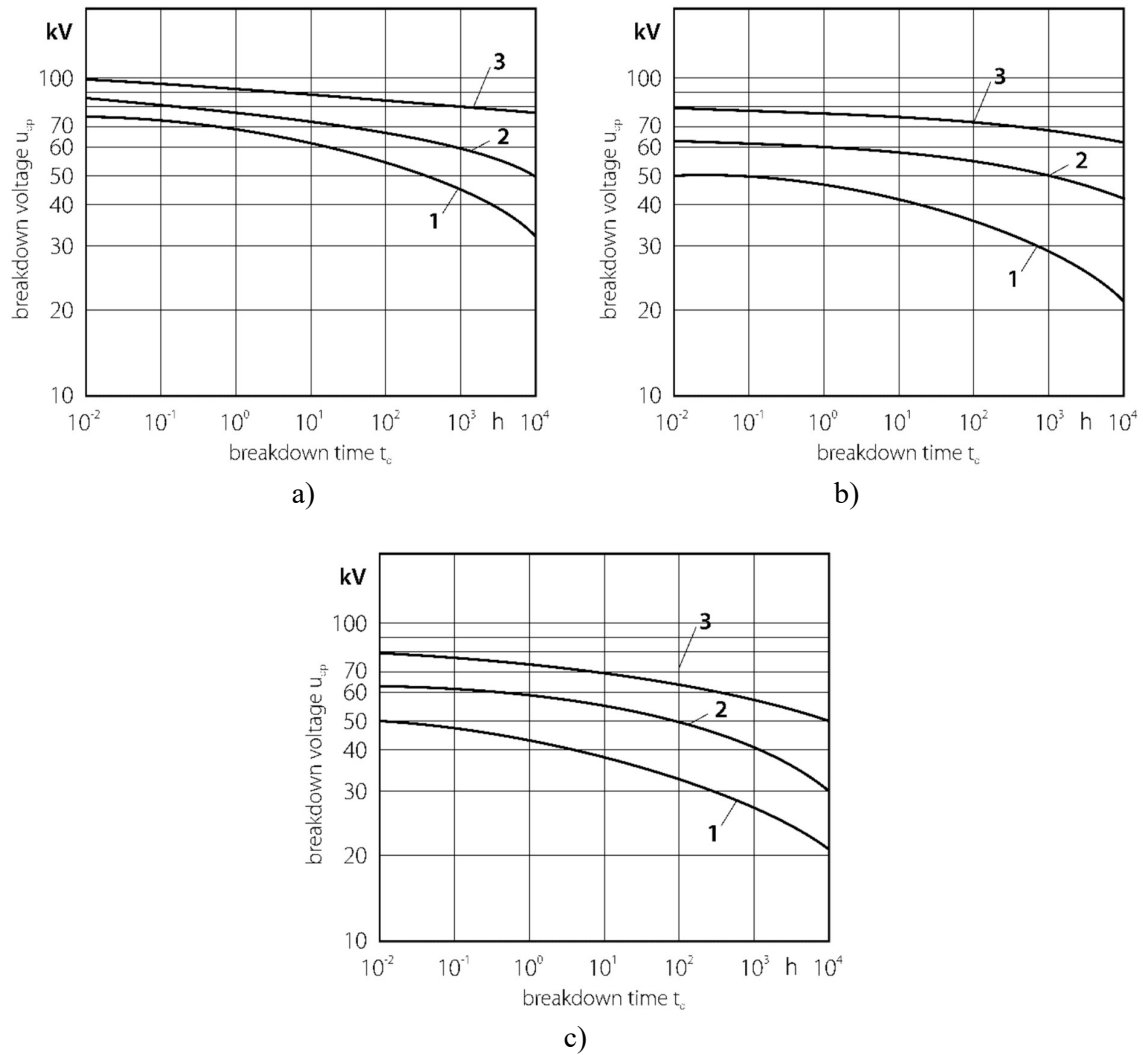
Slika 5.43 prikazuje zavisnost ac probojnog napona LGGL izolacije u zavisnosti od doze gama zračenja za uzorke uzete sa konure iz zona I, II i III.



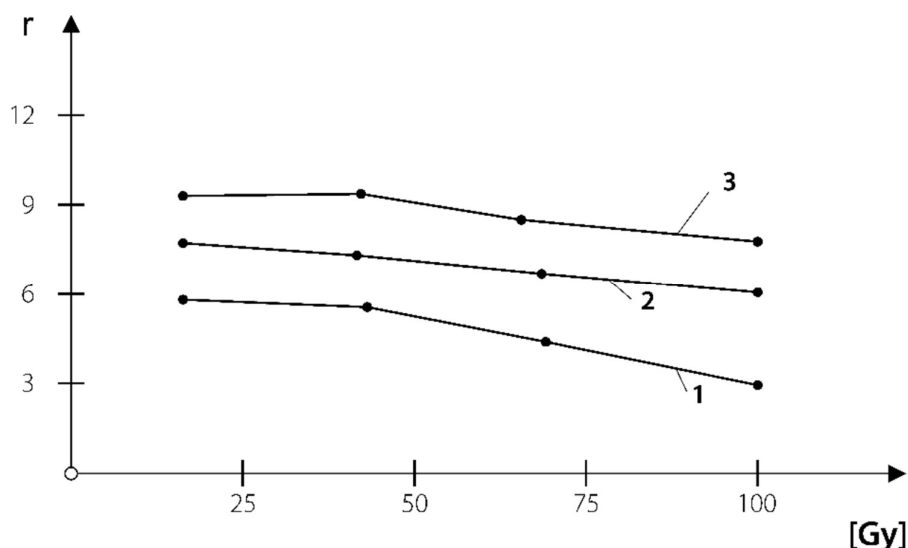
Slika 5.43 - Zavisnost ac probojnog napona od primljene doze  $\gamma$  zračenja: 1-zona I navoja, 2-zona II navoja i 3-zona III navoja. [55]

Sa slika 5.42 i 5.43 je očigledno da deponovana doza gama zračenja deluje na vrednost praga parcijalnog pražnjenja i na vrednost probojnog napona. Uticaj primljene doze gama zračenja je manje izražena na vrednost probojnog napona i direktno povezana sa opadanjem vrednosti praga parcijalnog pražnjenja. Naime, mala oštećenja u LGGL izolaciji koja nastaju usled deponovanja doze gama zračenja postaju slaba tačka izolacionog materijala i u njima se lako inicira parcijalno pražnjenje. Ovo je jasno sa slike 5.42 pošto se na njoj vidi da statistički uzorak slučajne promenljive napon praga parcijalnog pražnjenja uzoraka iz zone III nakon primljene doze od 100 Gy pripada Vejbulovoj raspodeli, a nezračenog uzorka više Normalnoj raspodeli. Da je uticaj doze gama zračenja najizraženiji za uzorak uzet iz zone I kanure posledica je tehnološkog postupka kojim je LGGL izolacija iz oblasti zone I elastično deformisana što je čini manje otpornu na gama zračenje.

Na slici 5.44 prikazane su karakteristike životnog veka 63%-nog kvantila za uzorke uzete iz zone I, II i III kanure uz dozu primljenog gama zračenja kao parametar. Na slici 5.45 prikazana je zavisnost eksponenta veka trajanja od primljene doze gama zračenja. Sa slike 5.44 se očigledno vidi da primljena doza gama zračenja ubrzava starenje LGGL izolacije i da drastično menja njegov mehanizam. To je usled činjenice da je primljena doza gama zračenja LGGL izolaciju lokalno oštećuje i zagreva. Posledica ovih efekata su izraženiji u uzorcima uzetim iz zone I i II kanure usled posledica tehnološkog postupka izrade kanure.



Slika 5.44 - Krive karakteristike životnog veka 63%-nog kvantila: a) neozračeni uzorci, b) ozračeni uzorci doza 50 Gy, c) ozračeni uzorci doza 100 Gy; 1-uzorci iz zone I navoja, 2-uzorci iz zone II navoja, 3- uzorci iz zone III navoja. [55]



Slika 5.45 - Zavisnost eksponenta veka trajanja od primljene doze  $\gamma$  zračenja: 1-zona I navoja, 2-zona II navoja i 3-zona III navoja. [55]

### 5.4.3. Uticaj neutronskeg polja na starenje i stabilnost karakteristika izolacionog sistema

Starenje za koje može da se očekuje interakcija neutronskeg polja i izolacionog sistema statora obrtne električne mašine su ne tako česti, ali za posledicu mogu imati katastrofalne ispadе koji nadmašuju sve što se može iskazati kao materijalna šteta. Razlog za to je da je do navedene interakcije moguće doći skoro isključivo ako obrtna električna mašina radi u nuklearno-energetskim sistemima gde, i pored svih sistema mera sigurnosti, njihov ispad dovodi do nesagledivih posledica.

Da bi se mogla napraviti predikcija osobina izolacionog sistema statora obrtne električne mašine korišćeni su navoji, koji su na prethodno opisani način uzeti iz zona I, II i III kanure. Identičnost uzoraka je proveravana merenjem vrednosti tangensa ugla gubitaka i primenom U-testa (statističke nesigurnosti 5%) na dobijene rezultate. Dobijeni rezultati su grupisani u statističke uzorke od po 50 koji su izlagani zračenju Ra-Be neutronskeg izvora u trajanju od 5 dana. Izvor neutronskeg zračenja je Ra-Be, aktivnosti 18.5 GBq, inteziteta neutrona  $7.3 \cdot 10^6$  n/s (prema sertifikatu kompanije Amershaw). Apsorbovana doza neutronskeg zračenja u izolatoru je određena kao apsorbovana energija od neutrona pomoću Monte Karlo simulacija, nakon eksperimentalnog potvrđivanja dobijenih vrednosti za neutronskeg fluks korišćenjem efikasnih preseka za apsorpciju neutrona u zlatnoj foliji. U tabeli 5.14 su dati podaci za apsorbovanu dozu neutronskeg i gama zračenja.

Tabela 5.14: Podaci o apsorbovanoj dozi neutronskeg i gama zračenja u zonama I, II i III kanure [63]

Zona	Neutronskeg fluks [n·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Apsorbovana doza [Gy]	
		Neutroni	Gama zračenje
I	$1.62 \cdot 10^5 (\pm 3\%^*)$	5.16 ( $\pm 3\%$ )	1033.1 ( $\pm 0.50\%^*$ )
II	$6.17 \cdot 10^4 (\pm 3\%)$	1.55 ( $\pm 3\%$ )	252.4 ( $\pm 1.00\%$ )
III	$3.50 \cdot 10^4 (\pm 3\%)$	0.70 ( $\pm 3\%$ )	98.2 ( $\pm 1.50\%$ )

\* Vrednosti u procentima u zagradi predstavlja ukupnu mernu nesigurnost, dok kod apsorbovane doze gama zračenja predstavljaju samo statističku nesigurnost Monte Karlo simulacija.

Na uzorcima koji su ozračeni i koji nisu ozračeni neutronima izvršeno je merenje izolacionih karakteristika: tangens ugla gubitaka, otpornost  $R_1$  i otpornost  $R_{10}$ , napon praga parcijalnog pražnjenja, ac probojni napon, koeficijent proporcionalnosti  $k$ , eksponent veka trajanja  $r$ . Merenja su vršena prethodno opisanim postupkom uz korišćenje istih standarda. Merna nesigurnost merenja nije bila veća od 5%.

Dobijeni rezultati su tretirani na sledeći način: 1) primenom Šoveneovog kriterijuma su odbačeni sumnjivi rezultati merenja; 2) primenom U-testa proverena je pripadnost svih slučajnih promenljivih jednog stohastičkog uzorka jedinstvenom statističkom uzorku; 3) slučajne promenljive svakog uzorka su  $\chi^2$ -testom i Kolmogorov testom testirane na pripadnost Gausovoj raspodeli i duplo-eksponencijalnoj raspodeli i 4) primenom momentne metode određeni su prvi, drugi i treći momenat statističkih raspodela dobijenih statističkih uzoraka.

#### 5.4.4. Rezultati i diskusija uticaja neutronske zračenja na preostali životni vek i druge karakteristike izolacionog sistema

U tabeli 5.15 su prikazani dobijeni rezultati merenja, tj. izolacione karakteristike od interesa (ozračene i neozračene). Takođe su prikazani rezultati za ozračene i neozračene uzorke koji su u eksploataciji proveli 10 godina i novih uzoraka.

**Tabela 5.15: Zavisnost tangensa ugla gubitaka ( $tg\delta$ ), indeksa polarizacije ( $s$ ), koeficijenta proporcionalnosti ( $k$ ), eksponenta veka trajanja ( $r$ ) u zavisnosti od primljene doze neutronske i gama zračenja [63]**

a)

Apsorbovana doza [Gy]		$tg\delta$ , zona I		$tg\delta$ , zona II		$tg\delta$ , zona III	
n	$\gamma$	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen
0	0	5.3	5.6	5.1	5.4	4.8	5.3
0.7	98	5.7	6.1	5.6	5.8	5.1	5.5
1.55	259	5.8	6.2	5.9	6.3	5.7	6.4
5.16	1033	6.1	6.5	6.0	6.4	5.9	6.8

b)

Apsorbovana doza [Gy]		$s$ , zona I		$s$ , zona II		$s$ , zona III	
n	$\gamma$	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen
0	0	4.08	3.78	4.35	3.90	4.40	4.29
0.7	98	3.96	3.52	4.15	3.81	4.28	4.14
1.55	259	3.72	3.28	3.90	3.73	4.05	3.91
5.16	1033	3.41	3.02	3.62	3.45	3.92	3.68



c)

Apsorbovana doza [Gy]		k, zona I		k, zona II		k, zona III	
n	$\gamma$	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen
0	0	6.31	5.35	6.41	5.65	7.43	6.75
0.7	98	6.01	5.00	6.10	5.32	7.21	6.58
1.55	259	5.87	5.72	5.95	5.28	7.05	6.32
5.16	1033	5.32	5.15	5.53	5.01	6.87	6.12

d)

Apsorbovana doza [Gy]		r, zona I		r, zona II		r, zona III	
n	$\gamma$	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen	Nov	Korišćen
0	0	12.2	11.2	12.6	11.6	12.8	11.7
0.7	98	11.9	10.9	12.1	11.2	12.6	11.4
1.55	259	10.6	9.8	11.7	11.0	12.1	11.2
5.16	1033	10.1	9.5	10.8	9.6	11.8	10.8

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.15 vidi se da neutronska i gama zračenje ima mnogo veći uticaj na dielektrične karakteristike LGGL izolacije kanure statora obrtne električne mašine. Upoređivanjem dobijenih rezultata sa odgovarajućim rezultatima dobijenim u polju gama zračenja jasno je da neutronska zračenje ima najdestruktivniji efekat na LGGL izolaciju od svih parametara kojim je vršeno naprezanje izolacije. Taj uticaj je drastično iskazan u pogledu ubrzanog procesa starenja i na njegovu nehomogenost.

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je, kao što je na početku naglašeno, bilo ispitivanje dužine životnog veka ili utrošak životnog veka i ostatak životnog veka visokonaponske obrtne mašine izložene objektivno očekivanim naponima tokom eksploatacije. Ovako postavljeni cilj je bez sumnje od velikog interesa za korisnike pošto ispad iz rada visokonaponske obrtne mašine može dovesti do štete koja znatno prevazilazi njenu vrednost, a u zavisnosti od pogona u kojem radi može dovesti i do katastrofalnih posledica. Teoretski gledano postići zacrtani cilj rada je jednostavno, treba odrediti krivu veka trajanja, sa kvantilom verovatnoće kao parametrom, i na osnovu te krive dati iskaz „ova visokonaponska obrtna mašina sa verovatnoćom jednakom onom usvojenom kvantilu će biti u pouzadnom pogonu, pod uslovima u kojima se koristi, još toliko i toliko vremena“. Teško da to pomaže pošto je osmišljen eksperiment za snimanje krive veka trajanja skoro pa neizvodljiv. Naime, potrebno je snimiti statistički uzorak od minimalno 50 slučajnih promenljivih uređenih parova (vrednost probojnog napona, vrednost probojnog vremena) metodom konstantnog napona. Može se ukazati da je prema Studentovoj raspodeli statistički uzorak od 50 slučajnih promenljivih minimum minimuma za pristojnu oblast poverenja donesenog zaključka. Naravno, ako se tome doda da je za ovako koncipiran eksperiment potrebno 50 identičnih visokonaponskih obrtnih mašina paralelno opterećenih konstantnim naponom i “beskrajno” strpljenje. Iako ovo prethodno rečeno već čini takav metod besmislenim, treba napomenuti i to da bi eksperiment bio dodatno besmislen pošto bi tokom ovog “beskrajnog” strpljenja, koje bi trajalo u beskrajnom vremenu, došlo do prirodnog starenja samog izolacionog materijala što bi dovelo do jedne složene sinerije posmatranog procesa starenja.

Ovaj uvod zaključka nameće potrebu za stvaranjem nekog bržeg, a pouzdanog algoritma snimanja krivih veka starenja. To je i urađeno u ovom radu. Primenom zakona porasta verovatnoće za Vejbulovu raspodelu se sa ispitivanja visokonaponske obrtne mašine, tačnije minimum 50 njih, prešlo na ispitivanje 50 prefabrikovanih navoja (kanura) iz tih mašina. Naravno naučno-stručna opravdanost tog prelaza je ispitana statističkim simulacijama i dobijeno je jako dobro slaganje (statistički izraženo preko regresionih pravih i koeficijenta korelacija) između rezultata dobijenih izolacijom celog statora obrtne mašine i sa pojedinačnim kanurama uzetim iz te mašine. To pojednostavljenje je samo delimično olakšalo postupak dobijanja krivih životnog veka (tj. krivih ostatka životnog veka). Međutim, zamenom kanure jednostavnim uzorkom uzetim iz njene glave, ostvareno je znatno smanjenje ispitivanog uzorka i znatno pojednostavljenje eksperimentalnog postupka. Taj napredak u pogledu krive određivanja životnog veka ipak nije od krucijalne važnosti. Naime, moguća potreba za dugotrajnim merenjem metodom konstantnog napona, takođe dugotrajne efekte starenja izolacionog materijala tokom eksploatacije proizvodi osnovni problem, a to je vreme potrebno za sprovođenje i finalizaciju eksperimenta konstantnim naponom pošto ispitivani material stari dvostruko, dok je u eksploataciji i dok se vrši merenje. Pošto ta dva, suštinski različita vremena mogu imati aditivne efekte koje nije moguće razlučiti bez napuštanja metode merenja konstantnim naponom. Napuštanje metode merenja konstantnim naponom bi ujedno bilo i napuštanje “zlatnog” pravila metrologije da se merenje merne veličine koja može sadržati stohastičke efekte, može meriti isključivo konstantnim naprezanjem (da se ne bi pomešala dva stohastička efekta – stohastičnost merene veličine i stohastičnost merne metode). Da bi se izbegla ova kontradikcija kao rešenje je prihvaćena primena eksperimentalnog postupka sa rastućim naponom, uz svođenje naponsko-vremenskih uređenih parova na vrednosti koje bi se dobile odgovarajućim eksperimentom konstantnim naponom. Time je ovaj teoretski eksperiment sa početka ovog zaključka znatno pojednostavljen što je omogućilo dobijanje zadovoljavajućih krivih ostataka veka trajanja za određeni kvantil verovatnoće u prihvatljivom realnom vremenu. Pošto su sve aproksimacije i pojednostavljenja eksperimentalno-stohastički potvrđene moglo se pristupiti ispitivanju ostatka životnog veka, uz unapred određen kvantil verovatnoće, na usvojeni standardni tip visokonaponske obrtne mašine. Pošto je eksperimentalni postupak krajnje pojednostavljen i uz kombinovanu mernu nesigurnost manju od 5% određeno je da se pored životnog veka (izraženog preko eksponenta životnog veka) odrede i drugi relevantni parametri starenja statorskog izolacionog sistema. Dakle, pored

eksperimenta veka trajanja određivani su i: koeficijent proporcionalnosti, parcijalno pražnjenje, tangens ugla gubitaka i indeks polarizacije. Promenljivi parametri su bili tokom merenja: temperatura, napon, mehaničko naprezanje, pravilno oscilatorno naprezanje, vreme provedeno u pogonu, itd. Razmatrana je i sinergija između ovih tipova naprezanja.

Dobijeni rezultati ukazuju da izolacione slabosti inicijalno nastaju tehnološkim postupkom izrade i da nisu ravnomerno raspoređene već da su skoncentrisane u glavi kanure. Vreme korišćenja visokonaponske obrtne mašine dovodi do dalje degradacije dejstvom funkcionalnih i ambijentalnih efekata na izolaciju statora obrtne mašine koja okončava ireverzibilnim probojem njene izolacije. Pomenuti funkcionalni i ambijentalni efekti deluju sinergistički pri razvoju starenja izolacije statora obrtne mašine i tako dovode do kraja njenog životnog veka, a samim tim i do kraja životnog veka izolacije. U tom procesu sinergije najviše doprinosi temperatursko naprezanje. Naime, neusaglašenost temperaturskih dilatacija komponenata od kojih je sačinjena kanura dovodi do pucanja izolacije, lepka i laka. Te pojave dovode do narušavanja kompaktnosti kanure koja se onda počne raslojavati usled dejstva mehaničkog (oscilatornog) naprezanja. Tom raslojavanju u početnoj fazi znatno doprinosi dejstvo elektrodinamičkih sila. U raslojene slojeve provodnika, izolatora i lepka može da prodre vlaga koja potpomaže da u sadejstvu prenapona i parcijalnih pražnjenja dođe do proboja izolacije kanure. Scenario sinergije posmatranih parametara ne ide nužno ovim putem, ali sigurno je da skraćuje životni vek izolacionog sistema statora električne mašine.

Pri tome su ustanovljeni sinergistički efekti tehnološkog postupka izrade, vremena korišćenja električne mašine i kombinovanog naprezanja. Svi dobijeni rezultati ukazuju da bi bilo preporučljivo blagovremeno remontovati obrtne električne mašine postavljanjem novih kanura najkasnije posle 15 godina korišćenja. Ovaj zaključak se ne odnosi na visokonaponske obrtne mašine koje su tokom rada izložene dejstvu radioaktivnog zračenja (gama i/ili neutronske) ili raznim tipovima prašine. Za takve slučajeve trebalo bi izvesti dodatna ispitivanja.

Posebним razmatranjem primenjivosti novog algoritma na uticaj neutronske i gama zračenja na izolaciju statora obrtne električne mašine je ustanovljeno da prisustvo neutronske komponente u zračenju ubrzava razgradnju LGGL izolacije. Do toga dolazi najverovatnije usled direktne interakcije sa strukturom laka i stakla koja vodi kidanju njihovih lanaca molekula. Takav proces je znatno efikasniji od dejstva samog gama zračenja koje interaguje isključivo sa elektronskim omotačem ili elektronima pojedinačno. Naravno, u najvećem broju uslova pod kojim funkcioniše obrtna električna mašina ne postoji verovatnoća da se nađe u polju neutronske zračenja. Međutim, ako takva mogućnost postoji, ispad iz rada takve mašine može da ima znatne posledice, tako da u takvom slučaju, stanje izolacije njihovog statora mora češće da bude ispitivano i remontovano ili zamenjivano i da se nakon zamene uklonjeni delovi tretiraju kao radioaktivni otpad.

## LITERATURA

- [1] G. Tauber, *Einsteinova opća teorija relativnosti*, ČBK Delo, Zagreb, 1984.
- [2] P. Osmokrović, *Knjiga postanja ili teorija velikog praska*, Akademski misao, Beograd, 2013.
- [3] S. N. Vukosavić, *Electrical Machines*, Springer, 2012.
- [4] IEC 60050 (Publication date: 1990-10). Section 411-31: Rotation Machinery - General, IEC ref. 411-31-10: "Induction Machine - an asynchronous machine of which only one winding is energized".
- [5] Peltola, Mauri. "AC Induction Motor Slip". Plantservices.com. Retrieved 18 December 2012.
- [6] Keljik, Jeffrey (2009). "Chapter 12 - The Three-Phase, Squirrel-Cage Induction Motor". *Electricity 4 : AC/DC Motors, Controls, and Maintenance* (9th ed.). Clifton Park, NY: Delmar, Cengage Learning. pp. 112–115. ISBN 978-1-4354-0031-3.
- [7] A. E. Fitzgerald, et al., *Electric Machinery*, McGraw-Hill, 1983.
- [8] L. Xiaodong, I. Obinna, *Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications*, (2011) IEEE Transactions on Industry Applications, 47(1), pp. 271–280.
- [9] A.R. Daniels, Introduction to electrical machines (Electrical and electronic engineering), Macmillan (January 1, 1976).
- [10] [https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog\\_5307/objava\\_22856/fajlovi/ObrtneMasine.pdf](https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_5307/objava_22856/fajlovi/ObrtneMasine.pdf)
- [11] T. A. Lipo, Introduction to AC Machine Design, Wiley, 2017.
- [12] [https://sever.rs/wp02/?page\\_id=65](https://sever.rs/wp02/?page_id=65)
- [13] S. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill Education; 5th edition, 2011.
- [14] M. G. Say, *Alternating Current Machines*, Pitman Publishing Ltd, 1976.
- [15] J. F. Gieras, *Advancements in Electric Machines*, Springer Netherlands, 2008.
- [16] I. Boldea, L. Tutelea, *Reluctance Electric Machines*, CRC Press, 2019.
- [17] M. E. El-Hawary, Principles Of Electric Machines With Power Electronic Applications, New Publisher, 2021.
- [18] L. Veréb, P. Osmokrović, M. Vujisić, Č. Dolićanin, K. Stanković, Prospects of constructing 20 kV asynchronous motors, (2009) IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16 (1), art. no. 4784574, pp. 251-256.
- [19] L. Vereb, P. Osmokrović, M. Vujisić, Z. Lazarević, N. Kartalović, Effect of insulation construction bending on stator winding failure, (2007) IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 14 (5), pp. 1302-1307.
- [20] L. Vereb, N. Kartalović, N. Atanackov, D. Ostojić, P Osmokrović, Inter-winding insulation and tendency of nominal voltage increase in high voltage asynchronous machines, (1998) Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report, 2, pp. 542-545.
- [21] [https://www.lhm.co.za/products/stator\\_coils/45.html](https://www.lhm.co.za/products/stator_coils/45.html)
- [22] <https://www.plantautomation-technology.com/products/preformed-windings/diamond-coils>
- [23] I. Jeftenić, N. Kartalović, D. Brajović, B. Lončar, Aging of stator coil interconductor insulation of high voltage asynchronous motor, (2018) IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25 (1), pp. 352-359.
- [24] F. Zec, N. Kartalović, T. Stojić, Prediction of high-voltage asynchronous machines stators insulation status applying law on increasing probability, (2020) International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 116, art. no. 105524.
- [25] W. Tong, Mechanical Design of Electric Motors, CRC Press, 2017.
- [26] Institut za elektro i mašinsku automatiku Subotica, Projekat: Istraživanja automatizovanih elektromotornih pogona, Tema: Određivanje termičkog indeksa izolacionih sistema, koje koristi domaća elektromašinogradnja, u funkciji ispitivanja proboja čvrstoće, Subotica, 1984-1985.

- [27] Institut za elektro i mašinsku automatiku Subotica, Projekat: Istraživanja automatizovanih elektromotornih pogona, Tema: Vek trajanja izolacionih sistema kao pokazatelj kvaliteta, Subotica, mart 1982.
- [28] Institut za elektro i mašinsku automatiku Subotica, Projekat: Istraživanja automatizovanih elektromotornih pogona, Tema: Vek trajanja izolacionih sistema kao pokazatelj kvaliteta, Subotica, Fazni izveštaj za 1981.
- [29] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, Hussein Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, ISBN: 9781118057063, Wiley Library, 2014.
- [30] W. Tillar Shugg, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, ISBN: 978-0-780-31030-8, Wiley-IEEE Press, 1995.
- [31] F. Petruzella, *Electric Motors and Control Systems*, McGraw-Hill Education, 2009.
- [32] M. Scarpino, *Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines*, Que Publishing, 2015.
- [33] A. Hand, *Electric Motor Maintenance and Troubleshooting*, McGraw-Hill Education, 2011.
- [34] I. Gottlieb, *Electric Motors and Control Techniques*, McGraw-Hill Education, 1994.
- [35] R. Miller, M. R. Miller, *Electric Motors*, Audel, 2003.
- [36] L. Vereb, N. Kartalović, P. Osmokrović, The Influence of the State of Inter-Winding Insulation on the Tendency of Normal Voltage Increase in High Voltage Asynchronous Machines, Ninth international symposium on high voltage engineering, Austria, 1995.
- [37] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, Wiley, 2013.
- [38] F. Allythi, *Three Phase Asynchronous Motors*, Shams Publishing, 2020.
- [39] P. Osmokrović, *Elektrotehnički materijali*, Akademska misao, Beograd, 2003.
- [40] R. Zachariason, *Electrical Materials*, Cengage Learning, 2nd edition, Boston, 2011.
- [41] P. Webera, L. Jouffe, Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN), (2006) Reliability Engineering and System Safety, 91, pp. 149-162.
- [42] M. Moazzami, R. Hemmati, F. Haghghatdar Fesharaki, S. Rafiee Rad, Reliability evaluation for different power plant busbar layouts by using sequential Monte Carlo simulation, (2013) Electrical Power and Energy Systems, 53, pp. 987-993.
- [43] Kartalović N., Stanković K., Lončar B., Numeričko modelovanje parametara parcijalnih pražnjenja, Tehnika, vol. 71, br. 3, str. 423-430, 2016.
- [44] N. Kartalovic, D. Kovacevic, and S. Milosavljevic, An Advanced Model of Partial Discharge in Electrical Insulation, Facta Universitatis (Nis), Ser: Elec. Energ., vol. 24, no. 1, pp. 43-57, April 2011.
- [45] C. P. Steinmetc, B. G. Lamme, Temperature and Electrical Insulation, (1913) AIEE Trans., Vol 32.
- [46] E. M. Fort, H. E. Pietsch, Aging of Insulation by Thermal and Electrical Stresses, (1975) Electrical/Electronics Insulation Conference Proc., pp. 143, IEE Publication No. 75 CH 1014-0-EF54.
- [47] T. Dakin, Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon, AIEE Trans., Vol. 67, pp. 113 – 122, 1948.
- [48] W. Mosch, Elektrische Isolierungen unter dem Einfluß von Konstruktion und Technologie, (1979) Elektrie, 33 (12), pp. 623-625.
- [49] Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, Copyright © 2014 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Wiley Online Library.
- [50] Z. Lazarević, R. Radosavljević, P. Osmokrović, A novel approach for temperature estimation in squirrel-cage induction motor without sensors, (1999) IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 48 (3), pp. 753-757.

- [51] E. L. Brancato, Insulating Aging a Historical and Critical Review, (1978) IEEE. Trans Electrical Insul., Vol EI-13. No.3.
- [52] C. V. Maughan, E. E. Gibbs, E. V. Giaquinto, Mechanical Testing of High Voltage Stator Insulation Systems, (1970) Conference Paper No.70 TP 45-PWR.
- [53] A. Boulter, *Mechanical Stresses as Ageing Factors of Electrical Insulation Systems*, (1976) International Electrotechnical Commission Technical Committee No.63: Insulation Systems.
- [54] H. Keuth, *Magnetischer PROTOFER*, Nutverschluss für elektrische Maschinen “Siemens-Zeitschrift”, 1970.
- [55] N. Kartalović, B. Jakanović, M. Bebić, Đ. Lazarević, The effect of gamma radiation on the stator insulation of rotating electrical machine, (2019) Radiation Effects and Defects in Solids.
- [56] Jakanović, B., Bebić, M., Kartalović, N., The influence of combined strain and constructive solutions for stator insulation of rotating electrical machines on duration of their reliable exploitation, International Journal of Electrical Power and Energy Systemsthis link is disabled, 2019, 110, pp. 36–47.
- [57] D. V. Spyropoulos, E. D. Mitronikas, A Review on the Faults of Electric Machines Used in Electric Ships, (2013) Advances in Power Electronics.
- [58] A. Cimino, C. Staubach, F. Jenau, Ageing behavior of the insulation system used in rotating machines, Conference: 2017 INSUCON - 13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON).
- [59] S. Nandi, H. A. Toliyat, L. Xiaodong, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review, (2005) IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, pp. 719–729.
- [60] W. Starr, H. Endicott, Progressive stress – A new accelerated approach to voltage endurance, (1961) IEEE Trans., PAS 55, 8, S. pp. 515-525.
- [61] M. Higashiyama, et al., Lifetime evaluation of oil-immersed power capacitor using conversion factor between model sample and practical equipment, (2011) IEEE Transaction on Power and Energy, 131(3), pp. 329-334.
- [62] C. Rusu-Zagar, P. V. Noñinger, C. Stancu, Ageing and degradation of electrical machines insulation, (2014) Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies, Volume 8, ISSN 1314-7269 (Online).
- [63] Kartalović, N.M., Jakanović, B.M., Bebić, M.Z., Lazarević, D.R., Degradation of stator insulation of high-voltage asynchronous machines in gamma and neutron radiation field, Nuclear Technology and Radiation Protectionthis link is disabled, 2019, 34(3), pp. 264–271.
- [64] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6).
- [65] Weibull, W., A statistical distribution funktion of wide applicability, J. of Applied Mechanics 18 (1951) 9, pp. 293-297.
- [66] W. Hauschild, W. Mosch, *Statistical Techniques for High-Voltage Engineering*, Institution of Engineering and Technology (Verlag), ISBN: 978-0-86341-205-9, 1992.
- [67] Billman, B.R.; Antle, C.E.; Bain, L.J., Statistical inference from censo-red Weibull samples, Technometrics 14 (1972) 11, pp. 831-840.
- [68] Kouno, T.; Endo, M.: Simulation of probability breakdown curve and presumption of the reliability of 50%-flashover voltage by means of electronic computer. J.I.E.E. (Japan) 84 (1964), pp. 25-33.
- [69] Bakken, J.A.: Determination of characteristic voltages in impulse and switching surge testing. IEEE Trans. Pass 86 (1967) 8, pp. 962-968.
- [70] Brookes, A.S.: The Weibull-distribution: Effect of length and conductor size of test cables. Electra Nr. 33, pp. 49-61.
- [71] Occhini, E.: A statistical approach to the discussion of the dielectric strength in elektric cables. IEEE Trans. PAS 90 (1971), pp. 2671-2682.

- [72] P. Bruce, A. Bruce, *Practical Statistics for Data Scientists: 50 Essential Concepts*, ISBN: 9781491952931, O'Reilly Media, Inc., 2017.
- [73] Brown, G.W.: Testing for cumulative flashover distribution, *IEEE Trans. PAS* 89 (1970) 6, pp. 1180-1191.
- [74] S. B. Djekic, et al., Passive and active shielding against electromagnetic radiation, (2020) *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 35(4), pp. 331-338.
- [75] Z. Milanović, et al., Calculation of impulse characteristics for gas-insulated systems with homogenous electric field, (2012) *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2), pp. 648-659.
- [76] Osmokrović P.; Marić R.; Stanković K.; Ilić D.; Vujisić M., Validity of the Space-Time Enlargement Law for vacuum breakdown, *Vacuum*, vol. 85, no. 2, pp. 221 – 230, August 2010.
- [77] T. H. Sie, O. Wohlfahrt, Transference of test results from experiments on small models to larger test objects with insulation under oil., (1962) *AIEE Trans.*, Part. III 81(12), pp. 601-608.
- [78] Boeck, W.: Volumen-Zeit-Gesetz beim Stoßspannungsdurchschlag von SF<sub>6</sub> ETZ-A 96 (1975) 7, pp. 300-305.
- [79] Voß, W.: *Untersuchungen zur Entwicklung paralleler Entladungen beim Stoßspannungsdurchschlag in Gasen*, Disertacion, TU Braunschweig 1979.
- [80] Osmokrović P.; Kartalović N., Applicability of simple expressions for electrical breakdown probability increase in vacuum and gas, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 1455 – 1460, 1997.
- [81] Osmokrović P.; Ilić G.; Dolićanin Č.; Stanković K.; Vujisić M., Determination of pulse tolerable voltage in gas-insulated systems, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 12, pp. 8928 – 8934, December 2008.
- [82] Osmokrović P.; Dolicanin C.; Vujisić M.; Vasić A., Time enlargement law for gas pulse breakdown, *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 18, no. 2, Article number 025028, 2009.
- [83] K. Stanković, et al., Statistical analysis of the characteristics of some basic mass-produced passive electrical circuits used in measurements, (2011) *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44 (9), pp. 1713-1722.
- [84] Dokopoulos, P.: *Vachtumgesetz*, Disertacion, TU Braunschweig, 1967.
- [85] Juchnewicz, J.; Mazurek, B.; Tyman, A.: On some size effects of high voltage vacuum insulation, 3. *International Symposia High-voltage*, Mailand (1979).
- [86] K. Stanković, P. Osmokrović, The Model for Calculating the Type A Measurement Uncertainty of GM Counters from the Aspect of Device Miniaturization, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 61, issue 3, pp. 1316-1325, June 2014.
- [87] W. Hauschild, R. Köppe, *Statistische Auswertung hochspannungstechnischer Messungen am Digitalrechner*, ELTRA-Fortschrittsbericht, IPH Berlin, 1973.
- [88] E. Ramsden, Measuring Magnetic Fields with Flux-gate Sensors, (1994) *Sensors*, 11(9), pp. 87-90.
- [89] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning*, Springer Series in Statistics, 2009.

## PRILOG

### P.1. IZRAŽAVANJE MERNE NESIGURNOSTI

Rezultati svakog sprovedenog eksperimentalnog postupka nužno ima u svojoj suštini određenu nedefinisanu nepouzdanost, a to znači da se tačna vrednost eksperimentalno određene veličine ne može tačno odrediti. Izvori mernih nesigurnosti su, uglavnom, mnogi i nije ih moguće istovremeno uzeti u analizu. Da bi se ostvarila sistematičnost prikaza rezultata merenja, institucije međunarodnog metrološkog sistema determinišu Uputstvo za izražavanje mernenesigurnosti<sup>9</sup> (u narednom tekstu tekstu MN) 1993. godine. Do tada su rezultati obrađivani teorijom primenjivana standardne matematička discipline, tzv. teorija grešaka. Teorija greške nije obezbeđivala nisu unificirani već su zavisili od načina prrimene pojedinih autora pa je bilo nemoguće uporediti merenja istih veličina obavljenih u različitim laboratorijama [1 - 3].

Prema Uputstvu za izražavanje MN, rezultati merenja se prikazuju preko naredne tri merne veličine:

- Srednja vrednost više ponovljenih merenja, naziva se srednja vrednost.
- Merna nesigurnost je izražena intervalom oko srednje vrednosti u kome se pretpostavlja da se nalazi tačna vrednost.
- Statistička sigurnost se referiše podatak o mernoj nesigurnosti.

Pored merne nesigurnosti paralelno se koriste i termin teorije greške. Ona se predstavlja kao razlika izmerenog rezultata i odgovarajućeg rezultata višekratno ponovljenog merenja uz primenu instrumenta koji se smatraju etalonom većeg prioriteta, odnosno instrumentima maksimalnog stepena tačnosti. Od etalonskog instrumenta je očekivanje da je atestiran u vrhunskom metrološkom institutu i da mu pripada sledivost u internacionalnom metrološkom sistemu.

Suština, svakog eksperimenta mora imati određenu (ispravno je reći izraženu) mernu nesigurnost. Greška merenja se određuje ređe, i to samo kada se za tim nametne potreba, a i postoji mogućnost. U slučaju da je merna nesigurnost korektno izražena greška merenja mora da se nalazi unutar nje.

Algoritam izražavanja merne nesigurnosti, prikazan u Uputstvu, zasniva se na matematičkom modelu koji se ne razlikuje mnogo od modela na kome se zasniva teorija grešaka. Metod izražavanja merne nesigurnosti je praktično koncipirana pa ju je moguće uspešno koristiti u skoro svim eksperimentalnim postupcima. Nasuprot tome, teorija grešaka ima osnov u aksiomatskim pojmovima, koji su apstraktni pojmovi, i koji se ne javljaju u praksi. Prema teoriji grešaka, sistematske greške su posledica uticaja pojava koje dovode do fiksnih varijacijama dobijene veličine kako po veličini tako i po znaku. Nasuprot tome, slučajne greške su po svojoj prirodi teško predvidljive pojave, što znači da se mogu analizirati statističkim metodama. Ovakve pretpostavke dela definicije, i ne odgovaraju realnim merenjima.

Ista veličina može imati istovremeno i slučajne i sistematske efekte. Polazeći od brzih promena, brze temperaturske promene mogu da imaju efekte koji su suština slučajnih grešaka. A sporije temperaturske promene imaju za posledicu promene koje odgovaraju sistematskim greškama. Moguće je da jedna pojava ima i brze i spore promene. Na primer, napon napajanja iz mrežnog ispravljača ima i brze fluktuacije, a i spore promene zavisne od temperature ambijenta i fluktuacije mrežnog napona, a na osnovu toga napajanje može u isto vreme izazivati i slučajne i sistematske efekte.

U suprotnosti idealizovanih osnova teorije grešaka, izražavanje merne nesigurnosti u Uputstvu je praktično primenjivo u analizi realnih eksperimentalno dobijenih rezultata. Pri izražavanju merne nesigurnosti koriste se svi pojmovi i kompletni matematički postupak statističke teorije. Ovo znači da ne postoji neki poseban matematički osnov posebno namenjen izražavanju mjerne nesigurnosti. Ipak je uvedeno nekoliko standarda među koje spada sledeće:

---

<sup>9</sup> Guide to Expression of Uncertainty in Measurement



- Oznaka za mernu nesigurnost su velika slova sa početnim slovom u (od engleske reči *uncertainty* što znači nesigurnost).
- Svi oblici merne nesigurnosti tretiraju se kao slučajne veličine. Iz toga razloga svakom podatku o nesigurnosti se pridružuje neka funkcija raspodela i vjerovatnoća, a samim tim i statistička pouzdanost datog podatka.

Merna nesigurnost donosi nove pojmove, a to su:

- Standardna merna nesigurnost,  $u$ , je u stvari jednaka standardnom odstupanju,  $u = s$ . Statistička sigurnost koja se pridružuje standardnoj MN ovisi od statističke raspodele koja se pridružuje posmatanom merenju. Na primer, u slučaju Gausove raspodele, intervalu širine jednog standardnog odstupanja,  $x_s \pm u$ , odgovara sigurnost od 68,2 %.
- Proširena merna nesigurnost,  $U$ , je proizvod standardne MN i nekog broja  $k$ , tj.  $U = k \cdot u$ .
- Broj  $k$  za proširenu mernu nesigurnost čija je tipična vrednost 2, naziva se brojem proširenja i obično se može kretati u razmaku od  $\sqrt{3}$  do 3.

Proširenoj MN se pridružuje značajna vrednost statističke sigurnosti, tipično od oko 95 % ili više. To znači da se sa velikom pouzdanošću očekuje da se stvarna vrednost merene veličine nalazi u intervalu  $x_s \pm U$ . Napomenimo, da proizvođači merne opreme u svojim katalogima daju intervale nesigurnosti koji predstavljaju proširenu MN.

Postoje dva tipa nesigurnosti:

- merna nesigurnost tip A i
- merna nesigurnost tip B.

Ova podela se zasniva isključivo na postupku određivanja, a ne na osnovu fizičkih pojava, koje su se uzimale za osnovu podataka slučajne i na sistematske greške u klasičnoj teoriji grešaka. Ukoliko postoje MN tip A i tip B, ili ako imaju više MN tip B, onda se služi terminom i kombinovane merne nesigurnosti.

#### P.1.1.1. MERNA NESIGURNOST TIP A

Tip A MN određuje se isključivo metodama matematičke statistike primenjenim na rezultate dobijene merenjem. Na ovaj način vrši se proračun merne nesigurnosti tip A kada se radi o merenju koje je ponovljeno više puta. Rezultati ponovljenih merenja predstavljavaju slučajne promenjive koje pripadaju nekom statističkom uzorku  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ . Ako su svi slučajni uzorci statističkog uzorka homogeni, odnosno ako su sva merenja izvršena istim postupkom pod nepromjenivim uslovima, to jest pod dobro kontrolisanim uslovima, i eksperimentalnom opremom istog kvaliteta, rezultat merenja se određuje kao srednja vrednost uzorka:

$$x_s = \frac{1}{n} \sum x_i$$

Prethodno je dokazano da srednja vrednost statističkog uzorka predstavlja slučajnu veličinu čija je vrednost standardnog odstupanja data izrazom, koji je za  $\sqrt{n}$  puta umanjen u odnosu na standardno odstupanja osnovnog statističkog uzorka. Po definiciji, MN tip A,  $u_A$ , ima istu vrednost kao i standardno odstupanje srednje vrednosti:

$$u_A = s_{x_s} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - x_s)^2}{n(n-1)}}$$

Srednja vrednost dobijena merenjem za statistički uzorak sa dovoljno slučajnih promenljivih zadovoljava uslove Centralne granične teoreme što ujedno znači da joj se pridružuje Gausova raspodela, a možda i t raspodela ako su statistički uzorci mali.

### P.1.2. MERNNA NESIGURNOST TIP B

Na osnovu definicije navedene u Uputstvu, MN tip B se određuje svim mogućim metodama, osim statističkim. Taj određeni stav kaže da algoritam za izražavanje merne nesigurnosti tip B omogućava korišćenje svih metoda, u stvari indirektno naglašava da postupak izražavanja MN tip B nije definisan, već da se prilikom njenog izražavanja koristi najpovoljniji postupak koji je zavistan od uslova i od mogućnosti onoga ko sprovodi eksperiment. Određivanje MN tip B, u slučaju komplikovanih eksperimentalnih sistema, predstavlja najkompleksniji postupak savremene metrologije. U cilju uspešnog izražavanja MN tip B treba poznavati karakteristike mernih eksperimenata (mada proizvođači u poslednje vreme u uputstvu za upotrebu daju i MN tip B za svoj instrument). Ipak to nije često dovoljno, pa se određivanje MN tip B vrši metodom Monte Carlo. Međutim, dobro izražena MN tip B podrazumeva primenu analitičke analize zasnovane na totalnom diferencijalu, podacima proizvođača, primene Monte Carlo metode i iskustvo merača koji je izražava.

Svaki tip naprezanja kao povratni odgovor ima stohastičke karaktere koji formiraju neki proizvoljan odgovor koji se izražava standardnim odstupanjem eksperimentalnog karaktera MN tip B sa odgovarajućim standardnog odstupanja eksperimentalnih rezultata. Standardna merna nesigurnost tip B,  $u_B$ , po prirodi, teži standardnom odstupanju pod uticajem datih naprezanja. I kod MN tip B, kao i kod svake veličine stohastičkog karaktera potrebno je pokušati definisati odgovarajuću funkciju raspodele. Za razliku MN tip A gde se očekuje Normalna raspodela po prirodi problema, kod MN tip B mogu se javiti sve moguće raspodele. Određivanje odgovarajuće statističke raspodele ne podrazumeva neki određeni algoritam već zavisi od praktičnih uslova eksperimenta.

### P.1.3. OSNOVNI NAČINI DOBIJANJA IZVORA O MERNOJ NESIGURNOSTI

Svakako najčešće korišćeni podaci o mernoj nesigurnosti tip B su podaci iz kataloga koje proizvođači instrumenata isporučuju zajedno sa instrumentima. Ti podaci koje isporučuju proizvođači se daju zavisno od mernih opsega, temperature i nekih drugih naprezanja relevantnih za nabavljeni instrument, odnosno njegovu namenu. Podatke o MN u katalogima proizvođača treba smatrati za proširenu MN ako nije drugačije naglašeno. U slučajevima nedostataka podataka o empirijski dobijenim statističkim raspodelama, kao funkcija raspodele preporučuje se ravnomerna-pravougaona raspodela.

Važnim izvorom podataka o MN mogu se smatrati podaci iz drugih akreditovanih laboratorija. Tu se pre svega misli na nacionalnu metrološku laboratoriju. Pri tome treba naglasiti da instrumenti koji se zvanično koriste moraju biti licencirani zakonskom procedurom koja podrazumeva opremu na višem nivou tačnosti. Svi podaci koji se dobijaju prilikom licenciranja instrumenata i postupaka njegove primene (kao i mogućim dodacima kvalifikovanih ispitivača) predstavljaju dragocene izvore za određivanje MN tip B.

### P.1.4. KOMBINOVANA MERNNA NESIGURNOST

Ako je MN je kombinacija više veličina onda je to kombinovana MN i predstavlja sumu veličina od kojih se sastoji i koje su njene konstitutivne komponente. Kombinovana MN se javlja u dva slučaja:

- Ako se MN tip A izražava serijom višestrukih merenja, pri čemu postoji jedna ili više konstitutivnih komponenti odnosno i za MN tip B ako postoje saznanja o višekomponentnom mernom sistemu;
- Ako postoji više mernih nesigurnosti tip B, a MN tip A je nula.

U slučaju kombinovane MN defininišu se standardno odstupanje  $u_c$ , kao i proširena nesigurnost  $U_c = k \cdot u_c$ , pri čemu je  $k$  faktor proširenja. Klasična kombinovana nesigurnost se proširuje standardnim postupcima koristeći vrednosti varijacije komponenti nesigurnosti. Statistička funkcija

raspodele slučajne kombinovane merne nesigurnosti izražava se kao konvolucija funkcija raspodela svih komponenata nesigurnosti. Problem određivanja konvolucije je izvor komplikacija za slučajeve koji se javljaju u uslovima obuhvata slučajeva mešanja tri, četiri, a nekada i više funkcija raspodele. Problem dobijanja rezultatne raspodele u složenijim slučajevima ne može se rešiti nikako analitičkim putem, pa se do rešenja dolazi samo primenom komplikovanih numeričkih postupaka. Najčešći metod numeričkog eksperimenta za određivanje konvolucije većeg broja raspodela je Monte Karlo metoda.

Da bi se prevazišli propusti osnovnog izdanja Uputstva, Međunarodna metrološka organizacija redovno publikuje dopune kojom dopunjava osnovne ideje i time unapređuje primene izražavanja MN. Nedavno je objavljen Dodatak Uputstvu za određivanje merne nesigurnosti koji je namenjen određivanju ekvivalentne funkcije raspodele korišćenjem Monte Karlo metode ([4], [5], [6]).

#### P.1.5. KOMBINOVANA MERNA NESIGURNOST

Postoje tri osnovna tipa kombinovane merne nesigurnosti:

- ako su komponente merne nesigurnosti međusobno statistički nepovezane;
- ako su komponente merne nesigurnosti potpuno statistički povezane, i
- ako komponente merne nesigurnosti imaju delimičnu statističku povezanost.

Najveću važnost ima sistem statistički nepovezane merne nesigurnosti, i njima će biti posvećena najveća pažnja jer oblici merenja u ovom radu odgovaraju tom slučaju.

#### P.1.6. SLUČAJ NEKORELISANIH KOMPONENTI NESIGURNOSTI

Nekorelisane slučajne veličine u slučaju kada promena jedne od njih ne utiče na promenu druge od njih se smatraju statistički nezavisnim. Problem standardnog odstupanja ne direktno merenih veličina se razmatra preko  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ , gde su promene uticajnih veličina  $x_i$  međusobno nezavisne statističke veličine. To je način nastajanja standardnog odstupanja (tip B) kombinovane nesigurnosti

$$u_{cy} = \sqrt{\sum \left[ \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{x_i}^2 \right]}$$

Dobar primer nekorelisanih slučajnih veličina su merne nesigurnosti tip A i tip B iz razloga što nastaju i što se identifikuju nezavisnim postupcima - MN tip A statističkim tretmanom stohastičkih rezultata ponovljenih merenja različitog ishoda, a MN tip B razmatranjem sistema postupka i organizacije istog. Jednom određena standardna merna nesigurnost, nesigurnosti  $u_{Ay}$  i  $u_{By}$  daju osnov za izražavanja kombinovane standardne nesigurnosti koja se dobija "sabiranjem" dveju nesigurnosti po algoritmu kvadratnog korena zbira kvadrata, tj.

$$u_{cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2}$$

## P.2. IZRAŽAVANJE MERNE NESIGURNOSTI ZA EKSPERIMENTALNE POSTUPKE U RADU

Tokom ovog rada su se vršila merenja sa relativno malom mernom nesigurnošću. Za to postoje dva razloga:

1. Statistička metoda izbora uzoraka za ispitivanje (tj. eliminacija sumnjivih uzoraka) bila je veoma stroga što je za posledicu imalo, uglavnom, malu mernu nesigurnost tip A;

2. Veoma male merne nesigurnosti tip B, pošto su za merenje korišćeni (često pozajmljivani) instrumenti sa izuzetno dobrim karakteristikama.

Treba napomenuti da prilikom izražavanja merne nesigurnosti nisu uzimane u obzir merne nesigurnosti korišćenih napreznja. Sada će se izraziti kombinovana merna nesigurnost dobijena na bazi statističke analize 50 uzastopnih merenja slučajne veličine i fabrički date vrednosti merne nesigurnosti tip B.

1. Tangens ugla gubitaka:

$$\text{MN tip A} = 2.82 \%$$

$$\text{MN tip B} = 1.70 \%$$

$$\text{KMN} = \sqrt{2.82^2 + 1.70^2} = 3.14 \%$$

2. Otpornost:

$$\text{MN tip A} = 2.41 \%$$

$$\text{MN tip B} = 1.00 \%$$

$$\text{KMN} = \sqrt{2.41^2 + 1.00^2} = 2.60 \%$$

3. Jednosmerna struja – stabilnost:

$$\text{MN tip A} = 2.80 \%$$

$$\text{MN tip B} = 2.10 \%$$

$$\text{KMN} = \sqrt{2.80^2 + 2.10^2} = 3.5 \%$$

4. Jednosmerna struja – merenje:

$$\text{MN tip A} = 1.40 \%$$

$$\text{MN tip B} = 3.85 \%$$

$$\text{KMN} = \sqrt{1.40^2 + 3.85^2} = 5.10 \%$$

5. Jednosmerni napon – merenje:

$$\text{MN tip A} = 0.62 \%$$

$$\text{MN tip B} = 0.28 \%$$

$$\text{KMN} = \sqrt{0.62^2 + 0.28^2} = 0.67 \%$$

6. Merenje udarnog napona 1.2/50  $\mu\text{s}$ :

$$\text{MN tip A} = 1.50 \%$$

$$\text{MN tip B} = 3.20 \%$$

$$\text{KMN} = \sqrt{1.50^2 + 3.20^2} = 3.53 \%$$

Uglavnom se može tvrditi da je kombinovana MN svih vršenih merenja bila manja (ili istog reda veličine) zbog neuzimanja u obzir mernih nesigurnosti napreznja, što je bilo nužno, jer za ovaj tip merenja stohastika proističe samo iz merene veličine, a nipošto iz merne opreme.

KORIŠĆENA LITERATURA ZA PRILOG

- [1] Predrag Osmokrović, Koviljka Stanković, Miloš Vujisić, *Merna nesigurnost*, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [2] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, (1995)
- [3] Kirkup L and Frenkel R B: An Introduction to Uncertainty in Measurement: Using the GUM, Cambridge University Press, (2006)
- [4] Taylor B N and Kuyatt C E: NIST Technical Note 1297: Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, Physics Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, (1994)
- [5] American National Standards Institute: U.S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ANSI / NCSL Z540-2-1997, (1997)
- [6] Grabe M: Measurement Uncertainties in Science and Technology, Springer, (2005)

## BIOGRAFIJA

Bojan Jakanović, rođen je 26.04.1984. godine u Sarajevu (Bosna i Hercegovina). Osnovnu školu „Jovan Dučić“ završio je u Trebinju. Srednju školu „Mješovita Srednja Elektrotehnička Škola“ završio je 2003. godine u Sarajevu. Postiže značajne uspehe na takmičenjima učenika osnovnih i srednjih škola u matematici i fizici. Elektrotehnički fakultet u Istočnom Sarajevu upisuje 2003. godine. Nosilac je Plakete Elektrotehničkog fakulteta za studenta sa drugim prosekom ocena na petoj godini studija u 2007/08 godini. Diplomiranjem na Odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Istočnom Sarajevu stekao je zvanje diplomirani inženjer elektrotehnike. Tema diplomskog rada je „Analiza greške na primjeru proračuna udarnih karakteristika uzemljivača“. Rad je odbranio sa ocenom deset (10). Godine 2008. upisuje postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, na odseku za Elektroenergetiku. Odbranivši magistarski rad pod naslovom „Predlog mera za smanjenje nivoa viših harmonika nastalih kompenzacijom reaktivne električne energije u EES“ stekao je titulu magistra elektrotehnike. Nakon toga se 2017. godine upisao na doktorske studije Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Prilikom upisa priznati su mu ispiti koje je položio tokom magistarskih studija i određeno da položi još predmete „Višemotorni električni pogoni“ i „Prelazne pojave u električnim mašinama“. Oba predmeta je položio sa najvećom ocenom čime je stekao uslov da pristupi proceduri prijave i izrade doktorske disertacije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, a u skladu sa odgovarajućim pravilnikom o III stepenu studija.

Po završetku studija, 19.01.2009. godine, zapošljava se u Energoinvest-Sistemi Upravljanja Energijom, gde i danas radi na projektovanju i implementaciji uređaja i rešavanju problema na polju kvaliteta električne energije, kao i pomoćnog napajanja. U proteklih šest godina projektovao je, ugradio i pustio u rad uređaje za kompenzaciju reaktivne energije za više od stotinu kupaca električne energije, ukupne snage 40 MVAR koji i danas rade i koje održava. Upravo jedan od takvih projekata je poslužio kao praktični deo magistarskog rada na kojem je radio duže od tri godine, kada je i položio poslednji ispit na Odseku elektroenergetika.

## **Izjava o autorstvu**

Ime i prezime autora \_\_\_\_\_

Broj indeksa \_\_\_\_\_

### **Izjavljujem**

da je doktorska disertacija pod naslovom:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis autora**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije dokorskog rada

Ime i prezime autora \_\_\_\_\_

Broj indeksa \_\_\_\_\_

Studijski program \_\_\_\_\_

Naslov rada \_\_\_\_\_

Mentor \_\_\_\_\_

Izjavljujem da je štampana verzija mog dokorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjivanja u **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objavljivati na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu

**Potpis autora**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## **Izjava o korišćenju**

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku "Svetozar Marković" da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

---

---

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim predlozima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo - nekomercijalno - deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo - bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.  
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave)

**Potpis autora**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerade.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo - deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.