

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Filip Zec

**Predikcija stanja izolacionog sistema
visokonaponske elektroenergetske opreme
primenom zakona porasta verovatnoće**

doktorska disertacija

Beograd, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Filip Zec

**Prediction of high-voltage equipment's
insulation system status by applying law on
increasing probability**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

Ova strana je namerno ostavljena prazna

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE
ZA ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE

- Mentor:

Prof dr Jovan Mikulović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

- Datum odbrane: dan, mesec, godina
(ukoliko nije poznat u momentu korišćenja dodaje se naknadno)

Ova strana je namerno ostavljena prazna

Zahvalnica

Zahvaljujem se svom ocu Iliji na pruženoj pomoći, roditeljskom razumevanju i nesebičnoj podršci tokom stvaranja ovog rada. Neizmernu zahvalnost iskazujem majci Marini na pruženoj podršci tokom čitavog školovanja, kao i tokom pisanja ovog rada.

Posebno se zahvaljujem i firmi FIMEL Company na omogućenoj realizaciji praktičnog dela rada i ustupanju visokonaponske laboratorije.

Takođe se zahvaljujem i svom kolegi dr Nenadu Kartaloviću na svom velikom trudu u mom naučnom usavršavanju, kao i doprinosu u realizaciji ovog rada.

I na kraju, zahvaljujem se mentoru profesoru Jovanu Mikuloviću na profesionalnoj podršci i ljudskom razumevanju na putu usavršavanja i rada.

Beograd, 20.02.2023.

Filip

Predikcija stanja izolacionog sistema visokonaponske elektroenergetske opreme primenom zakona porasta verovatnoće

Sažetak

Predmet istraživanja doktorske disertacije su modelovanje i procesi starenja izolacionih sistema visokonaponskih objekata (obrtne mašine, kablovi). Modelovanje se odnosi na utvrđivanje važenja zakona porasta verovatnoće nekog ishoda za model i n puta uvećani realni objekat (uvećana površina, broj elemenata idr.). Takođe, i algoritami za procenu radnog veka i preostalog životnog veka se oslanjaju na verovatnoću ishoda, prag napona parcijalnih pražnjenja – PDIV (*Partial Discharge Inception Voltage*), probojni napon – VBD (*Voltage Breakdown*) kao mere degradacije (starenja) odnosno pouzdanosti izolacionog sistema visokonaponskog (VN) objekata tokom vremena eksploatacije. Metode istraživanja su teorijske i eksperimentalne. Teorijski su izučavani izolacioni sistemi, stohastičnost posmatranih ishoda, matematička statistika. Tako su određeni koncepti eksperimenata (uzorci, merna oprema). Za obrtne mašine korišćeni su reprezentativni uzorci izolacionih sistema (formirani karakteristični uzorci prema skali 1:n, određene celine sistema i celi objekti). Za srednjenaponske kablove je korišćen veći broj formiranih uzoraka. Rezultati ispitivanja su pokazali da je moguće formirati modele izolacionih sistema i na pouzdan način ekstrapolirati ipitivane veličine na realan objekat. Takođe, rezultati su pokazali da je moguće procenjivati životni vek izolacionih sistema u složenim uslovima eksploatacije. Istraživanja su aktuelna i u skladu sa trendovima razvoja savremenih izolacionih sistema. Rezultati istraživanja su doprinela boljem razumevanju osobenosti visokonaponskih izolacionih sistema, unapređenju metoda i postupaka ispitivanja i dijagnostike stanja kako novoproizvedenih, tako i VN jedinica u pogonu. Takođe su unapređene metode i postupci procene radnog i preostalog životnog veka. To može doprineti racionalizaciji i finansijskim efektima u proizvodnji i eksploataciji VN objekata i korektivnom održavanju na produženju životnog veka.

- **Ključne reči:** starenje, životni vek, izolacioni materijali, električne mašine, srednjenaponski kablovi, zakon porasta, parcijalna pražnjenja, probojni napon

- **Naučna oblast:** Elektrotehnika

- **Uža naučna oblast:** elektroenergetika

Prediction of high-voltage equipment's insulation system status by applying law on increasing probability

Abstract

The subject of the doctoral dissertation research is modeling and aging processes of insulation systems of high-voltage objects (rotating machines, cables). Modeling refers to determining the validity of the law of increasing probability of outcomes for a model and a real object enlarged n times (increased area, number of elements, etc.). Also, the algorithms for estimating the working life and the remaining life rely on the probability of the outcome, Partial Discharge Inception Voltage – PDIV, Breakdown Voltage - VBD) as a measure of degradation (aging) of the insulation system during the operation period. Research methods are theoretical and experimental. Isolation systems, stochasticity of observed outcomes, mathematical statistics were theoretically studied. This is how the concepts of the experiments (samples, measuring equipment) were determined. For rotation machines, representative samples of insulation systems were used (characteristics samples formed according to the 1:n scale, individual parts of the system, and entire objects). A larger number of formed samples were used for medium voltage cables. The test results showed that it is possible to form models of insulation systems and reliably extrapolate the tested quantities to a real object. Also, the results showed that it is possible to estimate the lifetime of insulation systems in complex operating conditions. The research is according to the development trends of modern insulation systems. The results of the research contributed to a better understanding of the peculiarities of high-voltage insulation systems, improvement of methods and procedures of testing and diagnostics of the state of both newly manufactured and HV units in operation. Methods and procedures for estimating service life and remaining life have also been improved. This can contribute to rationalization and financial effects in the production and exploitation of HV facilities and corrective maintenance to extend the life span.

Key words: ageing, lifetime, insulating materials, electrical machines, medium voltage cables, growth law, partial discharges, breakdown voltage

Scientific field: electrical engineering

Scientific subfield: electroenergetics

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	ČVRSTI VISOKONAPONSKI IZOLACIONI MATERIJALI	7
2.1.	Klasifikacija čvrstih izolacionih materijala	9
2.1.1.	Neorganski izolacioni materijali.....	9
2.1.2.	Polimerni plastični organski materijali.....	10
2.1.3.	Ostali polimerni organski materijali	16
3.	ELEKTRIČNE OSOBINE ČVRSTIH IZOLACIONIH MATERIJALA	21
3.1.	Dielektrična permitivnost	21
3.2.	Specifična električna otpornost.....	22
3.2.1.	Specifična (ρ_v) i površinska (ρ_p) električna otpornost.....	23
3.3.	Dielektrični gubici.....	23
3.4.	Dielektrična čvrstoća	25
3.5.	Električne osobine važnijih dielektričnih materijala	26
4.	ELEKTRIČNA PRAŽNJENJA KOD IZOLACIONIH SISTEMA	29
4.1.	Osnovni pojmovi parcijalnih pražnjenja	29
4.1.1.	Osnovne veličine parcijalnih pražnjenja	31
4.1.2.	Osnovni tipovi parcijalnih pražnjenja	32
4.2.	Električni proboj kod čvrstih dielektrika.....	35
4.2.1.	Unutrašnji elektronski proboj volumena dielektrika	35
4.2.2.	Elektromehanički proboj.....	36
4.2.3.	Žbunasti proboj i proboj puznom stazom.....	36
4.2.4.	Elektrotermički proboj	38
4.2.5.	Elektrohemijski proboj.....	39
5.	IZOLACIONI SISTEMI ELEKTROENERGETSKE OPREME.....	40
5.1.	Izolacioni sistemi visokonaponskih obrtnih mašina.....	41
5.1.1.	Konstrukcija statorskog namotaja obrtnih mašina.....	42
5.1.2.	Nesavršenosti izolacionog sistema generatora	48
5.2.	Izolacioni sistemi visokonaponskih kablova	51
5.2.1.	Elementi konstrukcije energetskog kabla.....	51
5.2.2.	Tipovi energetskih kablova.....	53
5.2.3.	Nesavršenosti izolacionog sistema kablova	56

6.	STATISTIČKA OBRADA I ANALIZA REZULTATA.....	58
6.1.	Prikaz rezultata merenja pomoću histograma	59
6.2.	Statističke funkcije raspodele	60
6.3.	Analitičke funkcije raspodele.....	61
6.3.1.	Gausova normalna raspodela $N(\mu, \sigma^2)$	61
6.3.2.	Vejbulova troparametarska raspodela $W_3(U_w, \eta, \beta)$	62
6.3.3.	Vejbulova dvoparametarska raspodela $W_2(\eta, \beta)$	63
6.3.4.	Eksponencijalna dvoparametarska raspodela $E_2(U_w, \eta)$	64
6.4.	Ispitivanje hipoteza raspodela.....	65
6.4.1.	Test hi-kvadrat χ^2	65
6.4.2.	Kolmogorov Smirnov test	66
6.4.3.	Man Vitni test (U test)	67
6.5.	Metode procene parametara raspodele	68
6.5.1.	Metoda maksimalne verodostojnosti	68
6.5.2.	Modifikovana metoda maksimalne verodostojnosti.....	69
6.5.3.	Metoda momenata	70
6.5.4.	Modifikovana metoda momenata.....	71
7.	ZAKON PORASTA VEROVATNOĆE I MODELOVANJE	72
7.1	Izvođenje zakona porasta za slučaj uvećanja površine	73
7.2	Analiza funkcije porasta	75
7.3	Primena Vejbulove raspodele na zakon porasta	76
7.3.1	Standardno odstupanje i srednja vrednost probojnog napona pri povećanju uzorka za Vejbulovu raspodelu.....	77
7.4.	Koeficijent varijacije pri povećanju uzorka za različite raspodele.....	79
8.	ŽIVOTNI VEK VN IZOLACIONIH SISTEMA	81
8.1.	Električno starenje.....	81
8.2.	Termičko starenje.....	84
8.3.	Mehaničko starenje.....	85
8.4.	Starenje zbog okruženja	85
8.5.	Kombinovani procesi starenja izolacionog sistema.....	86
8.6.	Metode procena preostalog životnog EIS	87
8.7.	Karakteristike starenja statorske izolacije	92
8.8.	Karakteristike starenja kablovske izolacije	93
9.	ISPITIVANJA, REZULTATI I ANALIZE.....	95

9.1.	Merna i ispitna oprema i procedure.....	95
9.2.	Uzorci za ispitivanje izolacionog sistema obrtne mašine.....	99
9.3.	Rezultati ispitivanja i analiza za obrtne mašine.....	103
9.3.1.	Zakon porasta verovatnoće i modeli.....	103
9.3.2.	Preostali životni vek za obrtne mašine.....	113
9.4.	Uzorci za ispitivanje izolacionog sistema kablova.....	115
9.5.	Rezultati ispitivanja i analiza za kablove.....	116
9.5.1.	Zakon porasta verovatnoće i modeli.....	116
9.5.2.	Preostali životni vek za kablove.....	121
10.	Zaključak.....	123
	Bibliography.....	125

Lista tabela

Tab. 3.1	Relativne dielektrične konstante (ϵ_r) različitih materijala na sobnoj temperaturi i pri frekvenciji od 1 kHz. [38] [39].....	22
Tab. 3.2	Kategorizacija električnih izolacionih materijala preko vrednosti nekoliko najvažnijih veličina [9] [10].....	26
Tab. 3.3	Opseg vrednosti najvažnijih veličina za glavne izolacione materijale [10].....	26
Tab. 4.1	Kritična električna polja za termalni proboj dielektrika [46].....	38
Tab. 5.1	Termička klasifikacija izolacije obrtnih električnih mašina [46].....	42
Tab. 8.1	Uticaji pojedinih dominantnih procesa na starenje EIS statora. [13].....	92
Tab. 8.2	Uticaji pojedinih dominantnih procesa na starenje EIS kablova [22].....	94
Tab. 9.1	Struktura setova formiranih uzoraka za motore.....	100
Tab. 9.2	Površina provodnika ispitivanih dvoslojnih uzoraka i odgovarajući faktori uvećanja.....	102
Tab. 9.3.	Koeficijenti životnog veka za korišćene i nove uzorke.....	115
Tab. 9.4.	Parametri Vejbulove raspodele za različite skupove slučajnih promenljivih.....	117
Tab. 9.5.	Prikaz rezultata ispitivanja za nove uzorke kablova.....	121
Tab. 9.6.	Prikaz rezultata ispitivanja za korišćene uzorke kablova.....	122

Lista slika

Sl. 2.1	Molekularna struktura nekih polimera [10].....	13
Sl. 2.2	Efekat temperature na kristalizaciju PE [10] [32].....	15
Sl. 2.3	Specifična otpornost izolacije u funkciji temperature za različite čvrste materijale [10].....	18
Sl. 2.4	Promena ugla gubitaka $\tan \delta$ u funkciji temperature za različite čvrste materijale pri naizmeničnom naponu, 50 Hz [10].....	18
Sl. 3.1	Zavisnost kompleksne dielektrične konstante $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ od frekvencije [9].....	22
Sl. 3.2	Zavisnost specifične električne otpornosti od temperature [9].....	23
Sl. 3.3	Ugao dielektričnih gubitaka izražen preko kompleksne dielektrične konstante $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ [9].....	24

Sl. 3.4 Specifična jednosmerna provodnost za XLPE (σ_{DC}) u funkciji porasta električnog polja pri različitim temperaturama [33]	27
Sl. 4.1 Električni model izolacije sa parcijalnim pražnjenjem [41].....	29
Sl. 4.2 Defekt u izolaciji, gasni mehur, i ekvivalentni električni model; S1, S2 aktivne površine šupljine (karbonizirana ili metalizovana površina) [41]	30
Sl. 4.3 Dijagrami napona i struja kod parcijalnih pražnjenja: $V_{10} = V_a$ - napon na objektu, V_c -napon šupljine kada nema pražnjenja, $V_{20} = V_c$ -napon šupljine kada postoji pražnjenje, I_{pd} - strujni impulsi pražnjenja. ΔU_p , ΔV_p - stohastička odstupanja veličina U_p i V_p prespektivno [41]	30
Sl. 4.4 Primeri tipa A unutrašnjih parcijalnih pražnjenja [43] [44]	33
Sl. 4.5 Primeri tipa B površinskih parcijalnih pražnjenja [43] [44].....	34
Sl. 4.6 Primer tipa C parcijalnih pražnjenja – korona [43] [44].....	34
Sl. 4.7 Elektronska pražnjenja u homogenim čvrstim dielektrcima [45]	35
Sl. 4.8 Razvoj žbunastog proboja u zavisnosti od uslova [47]	37
Sl. 4.9 Ilustracija površinskih električnih pražnjenja [45]	38
Sl. 5.1 Slobodno motani namotaj motora.	43
Sl. 5.2 Kanure umetnute u statorske žljebove.....	44
Sl. 5.3 Formiranje namotaja statora od polunavojaka – štapova.....	45
Sl. 5.4 Konstrukcija Rebelovog štapa; a) način transpozicije elementarnih izolovanih provodnika duž štapa, b) poprečni presek bakarnog Rebelovog štapa sa provodnicima sa vodenim hlađenjem [12]..	45
Sl. 5.5 Složena struktura izolacionog sistema kod velikih obrtnih mašina [49].....	47
Sl. 5.6 Parcijalna pražnjenja i defekti izolacionog sistema [51]; a) defekti i pražnjenja u unutrašnjoj izolaciji štapa u zoni žljeba, b) defekti i pražnjenja u zoni glave namotaja	50
Sl. 5.7 Tipovi kablova u zavisnosti od mesta i načina polaganja [52] [53].....	54
Sl. 5.8 PILC kabl sa naznačenim oblogama [52] [53]	55
Sl. 5.9 Električno polje u PILC kابلu: a) pojasna konstrukcija, b) H tip kabla [53].....	55
Sl. 5.10 Ekstrudirani kabl sa označenim oblogama [52] [53].....	56
Sl. 5.11 Defekti u izolacionom sistemu kabla. 1-raslojavanje (delamination), 2-provodna izbočina, šiljak, 3- vodeni žbun (water tree), 4-lom izolacije, 5-elektroprovodni žbun, 6-uključci, 7- kratkospojni kanal vodenog žbuna, 8-vazдушna šupljina, 9-oštećenje slaboprovodnog sloja [22]	57
Sl. 6.1 Fitovanje histograma funkcijom gustine raspodele.....	60
Sl. 6.2 Prikaz Gausove raspodele za različite parameter $N(\mu, \sigma^2)$	62
Sl. 6.3 Prikaz Vejbulove raspodele u funkciji parametara $W_3(U_a, \eta, \beta)$	63
Sl. 6.4 Prikaz dvoparametarske Vejbulove raspodele u funkciji parametara $W_2(\eta, \beta)$	64
Sl. 6.5 Prikaz eksponencijalne dvoparametarske raspodele u funkciji parametara $E_2(U_a, \eta)$	65
Sl. 7.1 Osnovni uzorak $P1$ i n puta uvećani uzorak Pn	74
Sl. 7.2 a) Funkcija gustine $f(n,x)$; b) funkcija raspodele $F(n,x)$ za n - puta uvećan uzorak.	74
Sl. 7.3 Faktor redukcije b_n , za razne vrednosti β u zavisnosti od faktora uvećanja n	77
Sl. 7.4 Faktor redukcije a_n za razne vrednosti β u zavisnosti od faktora uvećanja n	78
Sl. 7.5 Koeficijenti varijacije u zavisnosti od faktora uvećanja n	80
Sl. 8.1 Procesi električnog starenja elektroizolacionog sistema [7]	82
Sl. 8.2 Vreme života EIS i tipovi procesa starenja. Zavisnost probojnog napona V_p od vremena trajanja opterećenja t_p	83
Sl. 8.3 Prikaz dinamike opterećenja i krive starenja nekog elektroizolacionog sistema	87
Sl. 8.4 Izvođenje karakteristike životnog veka; a) Empirijska funkcija raspodele vremena do proboja t_p ; b) Karakteristika životnog veka – r ; c) empirijska funkcija raspodele napona proboja U_p [10]	89

Sl. 9.1 Šema visokonaponskog ispitnog kola. R – zaštitni otpornik za ograničavanje struje; Cx – objekat; Ck – sprežni kondenzator; Zm – prilagodna impedansa; PD – detektor parcijalnih pražnjenja	96
Sl. 9.2 Ispitivanje PDIV i VBD na uzorcima VN mašine	97
Sl. 9.3 Ispitivanje PDIV i VBD na uzorcima kablova	98
Sl. 9.4 Tipska kanura. Prikaz interesnih zona namotaja I, II i III.....	99
Sl. 9.5 Dvoslojni uzorci različitih podužnih površina a) zona I; b) zona III	101
Sl. 9.6 Višeslojni uzorci različitih podužnih površina uzeti iz zone III namotaja	101
Sl. 9.7 Uzorci sa zaštitnim elementima: a) dvoslojni uzorak sa zaštitnom elektrodom i zaštitnim čepovima; b) višeslojni uzorak sa zaštitnim čepovima.....	102
Sl. 9.8 a) Postavljanje zaštitne uzemljene elektrode; b) Ispitivanje uzoraka u ulju.....	103
Sl. 9.9 Vejbulov papir verovatnoće za slučajne veličine PDIV - N_{2S} : a) zona II; b) zona III	104
Sl. 9.10 Histogrami klase (1+3,3logn) za slučajne veličine PDIV - N_{2S} sa i bez zaštite od površinskog proboja; a) b) zona II; zona III	104
Sl. 9.11 Vejbulov papir verovatnoće za VBD - N_{MS} ; a) zona I; b) zona III	105
Sl. 9.12 Histogrami klase (1+3,3logn) za slučajne veličine VBD - N_{MS} sa i bez zaštite od površinskog proboja; a) zona I; b) zona III	105
Sl. 9.13 Vejbulov papir verovatnoće za PDIV; a) N_{2S} zona I; b) N_{2N} zona II; c) N_{MS} zona II; d) N_{MN} zona II	106
Sl. 9.14 Vejbulov papir verovatnoće za VBD; a) N_{2S} zona I; b) N_{2N} zona III; c) N_{MS} zona III; d) N_{MN} zona III	107
Sl. 9.15 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na faktor uvećanja za slučajnu promenljivu: a) PDIV dvoslojni uzorak, zona II; b) VBD, višeslojni uzorak, zona III; (1) – Eksponencijalna raspodela; (2) – Dvoparameterska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparameterska Vejbulova raspodela –●– nov uzorak; (5) - Troparameterska Vejbulova raspodela; x - - - - korišćeni uzorak	108
Sl. 9.16 Vejbulov papir verovatnoće za ceo namotaj; a) PDIV K_{CS} ; b) PDIV K_{CN} ; c) VBD K_{CS} ; d) VBD K_{CN}	109
Sl. 9.17 Zavisnost srednje vrednosti probojnog napona od faktora uvećanja za N_{MN} -eksperimentalno dobijene tačke i fitovane krive na osnovu izraza (7.21); (1) + - Zona I, (2) x - Zona II (3) –●– Zona III	110
Sl. 9.18 Slika probijenog novog namotaja u zoni II.....	110
Sl. 9.19 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na broj namotaja za slučajnu promenljivu: a) „napon praga parcijalnih pražnjenja”, ceo namotaj b) „napon proboja”, ceo namotaj; (1) – Eksponencijalna raspodela; (2) – Dvoparameterska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparameterska Vejbulova raspodela: –●– nov uzorak; (5) Troparameterska Vejbulova raspodela - x - - - - korišćeni uzorak	111
Sl. 9.20 Zavisnost srednje vrednosti napona u odnosu na faktor uvećanja za a) PDIV dvojslojni uzorak iz zone II; b) VBD višeslojni uzorak iz zone III; –●– nov uzorak; x - - - - korišćeni uzorak	112
Sl. 9.21 Zavisnost srednje vrednosti napona u odnosu na broj namotaja za a) PDIV K_{CS} ; b) PDIV K_{CN} ; c) VBD K_{CS} ; d) VBD K_{CS}	112
Sl. 9.22 Zavisnost vrednosti standardne devijacije u odnosu na faktor uvećanja a) PDIV dvoslojni uzorak iz zone I; b) VBD višeslojni uzorak iz zone III;. –●– nov uzorak; x - - - - korišćeni uzorak	113
Sl. 9.23. Određivanje karakteristike životnog veka za ispitivanje pri konstantnom naponu za nove uzorke kanura.....	114

<i>Sl. 9.24. Određivanje karakteristike životnog veka za ispitivanje pri konstantnom naponu za korišćene uzorke kanura</i>	<i>114</i>
Sl. 9.25 Uzorci korišćenih kablova	116
Sl. 9.26 Vejbulovi Vejbulovi papiri verovatnoće za PDIV; a) novi uzorci; b) korišćeni uzorci	117
Sl. 9.27 Vejbulovi papiri verovatnoće za VBD; a) korišćeni uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 1 min; b) korišćeni uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 15 min; c) novi uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 1 min; d) novi uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 15 min	118
Sl. 9.28 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na broj kablova za slučajnu promenljivu PDIV; za novi uzorak (1) – Eksponencijalna raspodela; (2) – Dvoparametarska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparametarska Vejbulova raspodela: —●— nov uzorak; (5) Troparametarska Vejbulova raspodela - x - - - - korišćeni uzorak	119
Sl. 9.29 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na broj kablova za slučajnu promenljivu VBD: a) vreme trajanja koraka 1 min; b) vreme trajanja koraka 15 min; (1) – Eksponencijalna raspodela; (2) – Dvoparametarska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparametarska Vejbulova raspodela: —●— nov uzorak; (5) Troparametarska Vejbulova raspodela - x - - - - korišćeni uzorak.....	119
Sl. 9.30 Zavisnost slučajne promenljive PDIV u odnosu na broj kablova; a) korišćen kabl; b) nov kabl	120
Sl. 9.31 Zavisnost vrednosti slučajne promenljive (VBD) u odnosu na broj kablova; za korišćen kabl, a) vreme trajanja koraka 1 min; b) vreme trajanja koraka 15 min; za nov kabl c) vreme trajanja koraka 1 min; 4) vreme trajanja koraka 15 min;	120

1. UVOD

Predmet istraživanja u okviru disertacije je predikcija stanja izolacionog sistema visokonaponske (VN) elektroenergetske opreme primenom zakona porasta verovatnoće. Tema je višestruko interesantna imajući u vidu trendove razvoja izolacionih sistema gde postaje važna predikcija stanja izolacionih sistema visokonaponskih elektroenergetskih objekata. U tom smislu se istražuje mogućnost i način primene zakona porasta verovatnoće kao jednog od alata za predikciju stanja izolacionog sistema. Analizira se verovatnoća određenog ishoda (proboj, preskok, prag napona parcijalnih pražnjenja i dr.) koji se koristi za procenu verovatnoće otkaza, stepena degradacije – starenja, odnosno pouzdanosti izolacionog sistema VN objekata tokom eksploatacije.

Projektovanja, izvođenja i ispitivanja izolacionih sistema su dugotrajan i skup proces. Početna ispitivanjima se vrše na umanjenim modelima, prema utvrđenoj skali (1 : n) u skladu sa postavkama teorije zakona porasta. Istraživanja treba da utvrde da li izabrane merene veličine, i na koji način, podležu zakonu porasta verovatnoće u slučajevima poređenja modela izolacionog sistema i izolacionog sistema realnih objekata. U datim istraživanjima porast veličine VN objekata se posmatra preko porasta površine delova izolacionog sistema i porasta broja komponenti u sistemu.

Pored navedenih istraživanja korelacije umanjenih modela i realnog objekta, od posebnog interesa je istraživanje uticaja proteklog vremena eksploatacije (porast promeljive *vreme*) odnosno starenja ili preostalog životnog veka uz mogućnost primene zakona porasta verovatnoće. Cilj istraživanja je da se primenom zakona porasta verovatnoće utvrde relevantni parametri za ocenu stanja izolacije koji doprinose proceni životnog veka za nove VN jedinice kao i preostalog životnog veka, odnosno raspoloživosti VN jedinice u pogonu.

Prvi neposredni značaj istraživanja je u unapređenju dijagnostike stanja VN izolacionih sistema, kako novoprodučenih, tako i VN jedinica u pogonu odnosno povećanju raspoloživosti i pouzdanosti elektroenergetskih elemenata, sa značajnim materijalnim efektima. Drugi neposredni značaj istraživanja je u mogućim uštedama i finansijskim efektima u projektovanju i proizvodnji izolacionih sistema VN objekata.

Postavljeni zadatak je izrazito multidisciplinarni i interdisciplinarni, iz više razloga. U prvom redu sam izolacioni sistem se, kod VN objekata, sastoji od vrlo različitih elemenata i različitih materijala. Pri tome se koriste vrlo različite tehnologije proizvodnje materijala, izrade elemenata izolacionog sistema i njegovog konačnog formiranja. Zatim su od velikog značaja uslovi i pojave prilikom eksploatacije VN objekata odnosno izolacionog sistema. Sa druge strane, u praksi se koriste najrazličitije merne metode za utvrđivanje stanja izolacionog sistema. Rezultati ispitivanja se obrađuju specijalizovanim softverima koji koriste složene matematičke algoritme. Kod statističke analize generalno, kao i kod primene zakona porasta verovatnoće određenog ishoda koriste se matematički alati sa najnaprednijim funkcijama.

Objekti istraživanja su izolacioni sistemi koji su prisutni u visokonaponskim elektroenergetskim jedinicama kao što su izolacioni sistemi statora kod VN obrtnih mašina i izolacioni sistemi kablova kod kablovskih mreža.

Obrtne električne mašine su najvažniji elementi elektroenergetske opreme u proizvodnom delu EES-a (generatori i VN motori) kao i u industriji kada se zahteva velika pogonska snaga (VN motori). U skladu sa deklarisanim trendovima (povećanje gustine snage i produženje životnog veka izolacije) nastaju značajne promene zahteva u pogledu osobina izolacionih sistema VN obrtnih mašina. [1]

Takođe, u prenosu energije sve su zastupljenije kablovske energetske mreže uz prateću opremu. Sa stanovišta izolacionog sistema kablovske mreže su vrlo složene, počev od glavne izolacije kablova, preko izolacionog sistema spojnica i kablovskih završnica (glava).

Primarni zahtevi koji se postavljaju pred izolacioni sistem je da bude postojane visoke električne otpornosti na visokim naponima i dovoljno rezistentan na sve uticaje tokom eksploatacije kao i da omogući dug vek VN jedinice. To postavlja posebne zahteve prema projektovanju VN jedinica, njihovom modelovanju, zatim ispitivanju i realizaciji VN jedinice kao i održavanju tokom njihove eksploatacije. Statistička analiza dostupnih podataka iz eksploatacije kao i podataka iz eksperimenata ukazuju na to da primena zakona porasta verovatnoće treba da da značajan doprinos postavljenim ciljevima.

Polazna činjenica svih analiza izolacionog sistema je da ne postoji tehnički savršena VN izolacija, odnosno da uvek postoje manje ili veće nesavršenosti izolacionog sistema. Uzroci ovih nesavršenosti su raznoliki. Materijali od kojih je izrađen elektroizolacioni sistem mogu sadržati nehomogenosti odnosno nesavršenosti na koje se ne može uticati i koje se ne mogu otkloniti. Nesavršenosti takođe mogu nastati u toku proizvodnje izolacionih elemenata ili tokom formiranja izolacionog sistema VN jedinice. Karakteristike nesavršenosti i nehomogenosti su izrazito stohastičke prirode i podležu statističkim zakonitostima kao i zakonitostima porasta verovatnoće preko porasta površina, porasta broja komponenti, porasta volumena kao i porasta defekata tokom vremena. [1] [2]

Treba istaći da sve nesavršenosti nisu slaba mesta izolacionog sistema jer mogu biti izvan kritičnih opterećenja. Sa druge strane nesavršenosti odnosno slaba mesta mogu nastajati tokom eksploatacije VN jedinice, iz više razloga. Mogu da nastanu mehanička oštećenja, upad stranih tela i dr. Određeni procesi degradacije izolacionog sistema se podvode pod pojam starenje, koje uzrokuju ciklusi termičkih naprezanja (pregrevanja i/ili pothlađivanja), mehanička naprezanja i vibracije, vlaga, prašina, korozivna isparenja i ulja a kao prateći osnovni činilac su jaka dielektrična naprezanja. Tokom dielektričnog naprezanja visokim naponom (jakim električnim poljem) slaba mesta izolacionog sistema mogu da postanu mesta parcijalnih pražnjenja (PP) i/ili električnog proboja, odnosno preskoka. Navedeni procesi degradacije su takođe stohastičke prirode i podležu statističkoj analizi procesa starenja izolacionog sistema. Međutim, analize veličina koje su stohastičke i statističke prirode imaju određena ograničenja. Pouzdanost procena zavisi od raspoloživosti podataka iz laboratorijskih ispitivanja, proizvodnje, ispitivanja tokom eksploatacije. Za neke savremene materijale i rešenja izolacionih sistema nema dovoljno

eksploatacionih i eksperimentalnih podataka. Neki materijali su dugo vremena u upotrebi, za njih postoje statistički podaci iz eksploatacije i podaci iz laboratorijskih ispitivanja, tako da je proces starenja materijala poznat i procena preostalog veka trajanja može biti pouzdana. [1]

Utvrdjivanje stanja izolacionog sistema nekog VN objekta je složen postupak koji se sastoji od kompleksnih ispitivanja kako u proizvodnji tako i na terenu tokom eksploatacije. Zatim se vrše složene ekspertize pojedinačnih pokazatelja veličina stanja ali i utvrđuju njihove sinergističke sprege. Često se, radi dopune ekspertiza, vrše laboratorijska istraživanja i ispitivanja. U eksploataciji, tradicionalno se vrše periodični dijagnostički pregledi i ispitivanja koja imaju za cilj da u dužem vremenu odrede trendove promena stanja delova izolacionog sistema, ili da detektuju specifične nedostatke/mane koje se mogu razviti u delovima izolacionog sistema. Takođe se vrše i dodatna ispitivanja (zahtev po stanju) u cilju šire dijagnostike, procene pouzdanosti i raspoloživosti VN opreme odnosno preostalog veka. Značajni podaci se dobijaju i iz analiza slučaja dostupnih iz svetske prakse. [3] [4]

Razvijene su brojne metode za merenje različitih veličina koje se ispituju u skladu sa uslovima i standardima koji su često na strani restriktivnosti (povećane pouzdanosti). To su najčešće dielektrična ispitivanja kao što su elektroizolacioni otpor, dielektrična konstanta izolacije, faktor dielektričnih gubitaka, indeksi polarizacije i apsorpcije, specifična struja resorpcije. Zatim slede ispitivanje povišenim naponom, ispitivanje impulsnim naponom, ispitivanje parcijalnih pražnjenja (praga aktivacije i aktivnosti parcijalnih pražnjenja), probojni napon (dielektrična čvrstoća) i dr. U laboratorijskim uslovima sreće se i niz drugih standardizovanih i nestandardizovanih ispitivanja. [3]

Ispitivanja tokom eksploatacije praktično prate dinamiku starenja izolacionog sistema. Starenje kao skup procesa u izolacionom sistemu se manifestuje u degradaciji niza početnih svojstava izolacionog sistema. Postoji mnoštvo faktora koji različito utiču na starenje raznih izolacionih sistema. [5]

Faktori starenja odnosno način njihovog uticaja na stanje elektroizolacionog sistema VN objekata su brojni i u jednom delu se mogu posmatrati u odvojenim (aditivnim) uticajima ali je najčešće njihovo sinergističko delovanje najuticajnije na ubrzano starenje. Treba imati u vidu da sinergija delovanja faktora starenja može biti vrlo različita, u zavisnosti od vrste VN objekta odnosno vrste izolacionog sistema. [6]

Neki najznačajniji faktori starenja izolacionog sistema VN opreme su: termičko naprezanje, dielektrično naprezanje, mehaničko naprezanje, zračenje, sinergističko delovanje više faktora starenja kao i uticaji okruženja. Treba naglasiti da, ako su tokom eksploatacije navedena naprezanja u dozvoljenim (projektovanim) granicama, izolacioni sistem VN opreme će imati normalno starenje, a oprema projektovani životni vek. [7]

Dielektrično naprezanje koje uzrokuje starenje izolacije nastaje zbog stalno prisutnog električnog polja u izolaciji. Pri tome je neizostavna sinergija dielektričnog naprezanja sa nizom pratećih procesa kao što su parcijalna pražnjenja, površinske i unutrašnje struje curenja. Navedeni procesi, uz neizbežan uticaj okoline, dovode do niza degradacija

izolacionih svojstava. Doprinos degradaciji daju i slučajne stohastičke pojave atmosferskih, komutacionih i prenapona prelaznih procesa. Tada se mogu dešavati premašenja podnosivih vrednosti prenapona pri čemu dolazi do težih posledica po izolacioni sistem.

Medijum, kada je sastavni deo izolacionog sistema ili njegovo okruženje, svojim stanjem utiče na niz zapreminskih procesa u medijumu kao i površinskih procesa na dodirnim površinama sa izolacionim sistemom. Ako su u medijumu prisutne nekontrolisane količine agenasa kao što su vlaga, razna ulja, masti i razna agresivna isparenja, zatim provodna ili neprovodna prašina ili čestice, dolazi do ubrzane degradacije izolacionog sistema. Kada neki od faktora značajno premaši projektovane vrednosti, on postaje dominantan faktor starenja i kao takav se mora tretirati u proceni životnog veka. Na primer, ako se iz nekog razloga poveća aktivnost parcijalnih pražnjenja, uz prisustvo vazduha i vlage, pored ostalih delovanja dolazi do stvaranja azotne kiseline koja dalje degradira izolacioni sistem. Tako degradiran izolacioni sistem ima još veća parcijalna pražnjenja. Na izolacioni sistem deluje pozitivna povratna sprega i sinergija više faktora, ali su parcijalna pražnjenja dominantan factor.

Da bi se istraživala mogućnost primene zakona porasta odnosno uslovi njegove primene, moraju se imati u vidu složeni procesi od uticaja i njihova sinergija. Na osnovu relevantnih činjenica i saznanja formiraju se određeni modeli izolacionog sistema odnosno njegovog modula koji su reprezentanti posmatranog izolacionog sistema realnog objekta. Pri tome se određuju kontrolisani uslovi eksperimenta koji će omogućiti ekstrakciju dominantnih veličina odnosno parametra za dalju analizu. Modeli moraju da budu takvog karaktera da omogućuju ekstrapolaciju rezultata dielektričnih ispitivanja na, u definisanoj razmeri – skali, krupnije VN objekte. Razmera odnosno skala uvećanja može da se odnosi na uvećanu površinu, na uvećan broj modula odnosno broj karakterističnih detalja (na primer broj glava namotaja). Takođe je zakon porasta verovatnoće moguće primeniti na skaliranje (protok) vremena odnosno starenje. [8]

Utvrđivanje primenjivosti zakona porasta verovatnoće ishoda za posmatranu veličinu u odnosu na model i n puta uvećani VN objekat ili na protok vremena odnosno procenu preostalog životnog veka ima određenu proceduru, u više koraka. Jedan od uobičajenih načina primene je precizno utvrđivanje osnovnih parametara testirane raspodele F_1 za jedinične uzorke (modele) koja se odnose na izabranu stohastičku veličinu, na primer za probojni napon. Kako je proboj destruktivan (dovodi do uništavanja uzorka) potrebno je obezbediti veliki broj jediničnih uzoraka kako bi određivanje parametara raspodele F_1 bilo što preciznije. To je višestruko ekonomičnije nego obezbeđenje velikog broja realnih izolacionih sistema koji će biti uništeni destruktivnim ispitivanjima. Nakon toga se, korišćenjem manjeg broja uzoraka različite razmere do maksimalno n , utvrđuju dodatni parametri skaliranja koji omogućuju ekstrapolaciju rezultata raspodele F_1 na raspodelu F_n . Pri tome je n skalirajući faktor koji se može odnositi na n puta uvećanu površinu, uvećanu zapreminu, uvećan broj elemenata i dr. S obzirom na odnos modela i realnih objekata u pogledu veličina od interesa, neophodno je statističku analizu vršiti pomoću razvijenih modela mešovitih raspodela. [1] [2] [9]

Prilikom dokazivanja primenljivosti zakona porasta verovatnoće za procenu stanja izolacionog sistema odnosno procenu njegovih karakteristika u realnim uslovima i u vremenu, osnovni zadatak je fimirati takve modele izolacionog sistema za svaki VN objekat od interesa koji reprezentuje relevantne dielektrične karakteristike celog izolacionog sistema ili jednog njegovog modula. Postavlja se hipoteza da usvojeni model reprezentuje izolaciono najslabiji deo sistema ili modula koji određuje njegovo dielektrično ponašanje.

Adekvatna statistička analiza rezultata određenih ishoda izabrane stohastičke veličine za određeni broj uzoraka ili modela izolacionog sistema VN opreme treba da odredi pogodnu statističku raspodelu koja potvrđuje primenljivost zakon porasta verovatnoće za izabrano naprezanje. Tvđenje se zasniva na pretpostavci da Vejbulova raspodela omogućuje iznalaženje parametara zakona porasta verovatnoće koji omogućuju ekstrapolaciju rezultata ispitivanja od uzoraka i modela do realnog objekta.

Stohastičke veličine koje se ispituju su parcijalna pražnjenja (naponski prag i aktivnosti), probojni napon i podnosivi napon. Vejbulova raspodela omogućuje iznalaženje parametara zakona porasta verovatnoće za svaku navedenu veličinu odnosno metodu ispitivanja i to na način koji omogućava ekstrapolaciju rezultata.

Utvrđivanje (preostalog) životnog veka se zasniva na statističkim analizama rezultata eksperimentalnih ispitivanja i dostupnih podataka iz eksploatacije. Pouzdanost utvrđivanja životnog veka se zasniva na eksperimentima na većem broj uzoraka i modela izolacionog sistema VN opreme izloženih poznatim i kontrolisanim naprezanjima tokom različitih vremena eksploatacije, počev od novih pa do uzoraka sa događajem otkaza (kraja životnog veka). [6]

Za statističke analize se koriste različiti matematički postupci i statističke raspodele, pre svega Vejbulova raspodela. Istraživanja su dovela do unapređenja metoda i postupaka ispitivanja i dijagnostike izolacionih sistema VN objekata. Rezultati su primenjivi u praksi i doprinose unapređenju pouzdanosti i raspoloživosti VN objekata odnosno produženju životnog veka.

Karakterizacija izolacionih materijala i sistema je vrlo složena i široka. Za potrebe konkretnog istraživanja neophodno je suziti obim karakterizacije. Analiza se usredsredila na relevantna dominantna opterećenja i pojave u izolacionom sistemu VN objekata sa akcentom na ispitivanju parcijalnih pražnjenja, dielektrične čvrstoće (probojnog napona) i podnosivog napona. Istraživana je korelacija između datih veličina i dominantnih procesa starenja. Razvijani su algoritami za procenu veka trajanja izolacionog sistema VN objekata primenom statističkih metoda, pre svega primena Vejbulove raspodele na zakon porasta verovatnoće za određeni posmatrani ishod.

Na osnovu rezultata analiza razvijeni su numerički i eksperimentalni modeli reprezentativnih uzoraka izolacionih sistema realnih objekata od interesa. Na osnovu toga utvrđen je koncept eksperimentalnih postupaka i statističke analize rezultata. Razvijen je niz algoritama za obradu rezultata eksperimenata, za ispitivanje pripadnosti

uzoraka jednog tipa jedinstvenom statističkom uzorku. Takođe, razvijeni su algoritmi za predikciju karakteristika izolacionog sistema i starenja sistema.

S obzirom da je tema izrazito multidisciplinarna, pregledana je i analizirana brojna literatura vezana za oblasti istraživanja i srodne i granične oblasti. Postoji brojna relevantna naučno-stručna literatura iz oblasti savremenih izolacionih materijala, njihovih karakteristika, eksploatacionih podataka, tehnoloških postupaka njihove proizvodnje kao i podaci o kompleksnim izolacionim sistemima VN objekata (mašina, kablova, ...). [10] [11] [12] [13] [14] Dostupnost velikog broja podataka o izolacionim materijalima i sistemima omogućuje detaljne analize i utvrđivanje parametara za predikciju njihovog ponašanja. Sa tim ciljem analizirana je literatura i standardi iz oblasti dielektričnih i visokonaponskih ispitivanja izolacionih sistema VN objekata. [15] [16] [17] [18] Korišćena je značajna naučno-stručna literatura iz oblasti matematičkih modela i statističke analize. [19] [20] [2] Primijenjena je za formiranje modela vezanih za istraživanje zakona porasta verovatnoće ishoda, zakonitosti starenja izolacionih sistema a pre svega u oblasti merenja, obrade podataka i karakterizacije izolacionih sistema. [21] [8] [22] [23]

Referenca [1] prikazuje numerički algoritam za ocenu stanja izolacije visokonaponskog motora primenom Vejbulove troparametarske funkcije raspodele. Kao metode ispitivanja autori su izabrali dve metode, jednu nedestruktivnu (prag napona parcijalnih pražnjenja) i jednu destruktivnu (napon proboja). Iako korisna literatura, nedostatak je što nije prikazan preostali životni vek VN jedinice, kao i primena zakona porasta verovatnoće određenog ishoda za ostalu VN opremu od interesa (kablovi, prolazni i potporni izolatori itd.)

U literaturi [24] su date dobre teorijske osnove za primenu Vejbulove funkcije raspodele kod visokonaponskih DC kablova. Iako se ovakav tip kabla koristi u određenim mrežama, njegova primena je dosta manja u poređenju sa napojnim distributivnim AC kablovima. U referencama [25] [26] je prikazano poređenje parametra oblika između ispitivanog uzorka kabla i realnog kabla. Za ispitivanje se koristio impulsni napon što predstavlja nedostatak jer se ovakav oblik napona se ne koristi u uobičajenim ispitivanjima kablova. Naime, ispitivanje impulsnim naponom izolacija kabla nije dovoljno i na odgovarajući način napregnuta da bi se otkrili eventualni defekti. U literaturi [27] je izvršeno modelovanje pomoću dvoparametarske i troparametarske Vejbulove raspodele za transformatorsko ulje. Ispitivanje je takođe vršeno impulsnim naponom.

2. ČVRSTI VISOKONAPONSKI IZOLACIONI MATERIJALI

U elektrotehnici se koristi jako veliki broj materijala koji ispoljavaju najrazličitije karakteristike. U početku su korišćeni prirodni materijali i postojeći industrijski materijali. Kasnije su se razvijale tehnologije novih elektrotehničkih materijala.

U početku je kriterijum za podelu bio „specifična otpornost materijala“ gde su uspostavljene granice na sobnoj temperaturi (i ostalim normalnim uslovima) date u opadajućim eksponentima: [9]

- dielektrici - ρ (10^{19} - 10^{10}) Ωm ,
- poluprovodnici - ρ (10^{10} - 10^{-6}) Ωm ,
- provodnici - ρ (10^{-6} - 10^{-8}) Ωm .

Pri čemu specifična električna otpornost je veličina koja zavisi od niza činilaca: temperature, pritiska, vlage, sastava i strukture materijala, električnog polja i drugih veličina.

Kasnije se razumelo da pomenuta specifična električna otpornost ima korelaciju sa energetske procenom E_g između provodne i valentne zone (između kolektivnih elektronskih nivoa u materijalu). Tako se, prema veličini zabranjene energetske zone (u opadajućem nizu) elektrotehnički materijali mogu podeliti kao: [9]

- dielektrici - $E_g > 3$ eV,
- poluprovodnici - E_g (0 - 3) eV,
- provodnici - $E_g \leq 0$ eV (preklapanje provodne i valentne zone).

U elektroenergetici se koristi veliki broj izolacionih materijala i medijuma. Mogu se podeliti u sledeće kategorije:

- čvrste
- tečne
- gasovite i
- vakuum.

Čvrsti izolacioni materijali su istovremeno i konstrukcioni materijali. Zastupljenost materijala se menjala kroz vreme, razvojem tehnologija i novih materijala a takođe i menjanjem zahteva razvojem elektroenergetskih objekata.

Tečni izolacioni materijali su razna mineralna i sistetička izolaciona ulja a u novije vreme i organska ulja. Pored zahteva za izolaciona svojstva, ulja se koriste za impregnaciju nekih čvrstih materijala ali i kao rashladni medijum.

Gasoviti izolacioni materijali su medijumi koji se koriste kao izolacija, na normalnom ili većim pritiscima. Najčešće se koristi vazduh, zatim prirodni ili sintetički gasovi visokih performansi za upotrebu u elektrotehnici. Gasovi se takođe koriste i kao rashladni medijum.

Vakum kao izolacioni medijum se koristi kod visokonaponske opreme od koje se traže posebne performanse, najčešće kod vakuumskih prekidača i vakuumskih rastavljača snage.

U praktičnoj primeni izolacionih materijala, njihove osobine kao što su termička i mehanička svojstva značajno određuju električna svojstva opreme. Na primer, gasoviti i tečni dielektrici su regenerativnog karaktera prilikom proboja ili parcijalnih pražnjenja, dok se kod čvrstih dielektrika pojavljuju trajnija oštećenja i kumulativnog su karaktera.

U elektrotehnici se sreću kombinacije izolacionih materijala i konstrukcionih rešenja koji čine elektroizolacione sisteme. Zbog posebnih konstrukcionih i izolacionih zahteva za visokonaponsku opremu i sisteme koristi se veliki broj čvrstih izolacionih materijala. Sa razvojem savremenih izolacionih materijala, pre svega kompozitnih, neki raniji konvencionalni materijali su potisnuti ali se još uvek primenjuju, kao što je drvo kod transformatora.

Vremenski period u kome izolacioni elemenat ima zadovoljavajuća izolaciona svojstva, uzimajući u obzir eksploatacione uslove, tj kombinovana termička, mehanička i električna naprezanja, naziva se „životni vek“. Češće se procenjuje „preostali životni vek“ izolacionog sistema u celini ili nekog izolacionog elementa. Kod koncipiranja izolacionih sistema, ovo je veoma važan aspekt koji vodi računa o kompatibilnosti materijala, uslovima eksploatacije i drugim činjenicama kao što su izloženost atmosferi, vremenskim neprilikama (kiša, oluja, grad, naslage leda itd.), IC i UV zračenju, zagađenju (prašina, soli itd.) i dr.

Sa stanovišta primene, čvrsti izolacioni materijali mogu se podeliti u sledeće četiri široke kategorije: materijali za oblikovanje (livenje), materijali za izolaciju i zaštitu, materijali za ispunu i impregnaciju, i konstrukcioni izolacioni materijali [10]

Materijali za oblikovanje i livenje: koriste se za mehaničke čvrste oblike izolacije, na primer, izolatori, prolazni izolatori itd. Takvi materijali moraju imati dobra električna izolaciona svojstva pored visokih mehaničkih performansi. Obično se izrađuju od keramike, stakla (kaljeno staklo), fiberglasa, ojačane plastike i epoksidne smole.

Materijali za izolaciju i zaštitu: odnosi se na materijale koji ispunjavaju prostor u kome razdvajaju provodnike na različitim naponima a nisu prvenstveno konstrukcioni. Tako su se polimeri pokazali pogodnim kao izolacija provodnika: polietilen (PE), polivinilhlorid (PVC), prirodna i sintetička guma (etilen propilen). Integrišu se u kabl ekstrudiranjem oko provodnika u više slojeva izolacije i zaštite energetskog kabla. Nešto je drugačija tehnologija kod električnih mašina gde se više koriste kompoziti ili sistemi na bazi polipropilena, papira, staklenih vlakana, liskuna i drugih

Materijali za ispunu i impregnaciju: to su materijali koji imaju osobinu difuzije u šupljinama čvrstih izolacionih materijala, najčešće papira. Pored izolacionih ulja, koriste se jedinjenja na bazi voska. Najčešća upotreba je kod energetskih kablova, transformatora, kondenzatora i drugih.

Izolacioni konstrukcioni materijali: to su izolacioni potporni elementi i delovi mašina. Izrađuju se u obliku ploča, cevi, cilindara, greda, a od materijala kao što su iverica, tvrdi papir, tanki papirni laminati, drvo, ebonit (vulkanit), guma, bakelit, akrilna epoksidna smola i drugi kompoziti i sintetički materijali. Koriste se kod transformatora, prekidača, rastavljača, potpornih i drugih i izolatora.

2.1. Klasifikacija čvrstih izolacionih materijala

Može se uspostaviti više kriterijuma za klasifikaciju čvrstih izolacionih materijala. Najčešća klasifikacija čvrstih izolacionih materijala je po svom hemijskom sastavu. Tako se klasifikuju kao neorganski, organski i kompoziti materijali. [9] [10]

2.1.1. Neorganski izolacioni materijali

Kao neorganski izolacioni materijali najčešće se koriste keramike, stakla, staklena vlakna (fiberglas), email, liskun, azbest i drugi. Zajednička strukturna osobina ovih materijala je da nisu homogeni, bilo mikroskopski bilo makroskopski. Navedeni materijali se ističu po svojoj sposobnosti da izdrže visoke temperature i da su rezistivni na veći deo hemikalija. Kao takvi, imaju visoku postojanost odnosno praktično zanemarljive znake starenja. Sa druge strane loša osobina im je nepogodnost za mehaničku obradu. [9] [10]

2.1.1.1. Keramika kao izolacioni materijal

Keramika, poznata i kao porculan ili porcelan, u nekoj od svojih varijanti odavno se koristi kao izolacioni materijal. Keramičke supstance su proizvedene od gline, sadrže aluminijumoksid i druge neorganske minerale. U sastav ulazi od 40% do 50% gline, 30% do 20% aluminijum oksida i 30% feldspata, odnosno ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) i SiO_2 . Keramika veće mehaničke čvrstoće i manjih dielektričnih gubitaka takođe sadrže steatite (kamen sapunice) i talk (MgO , SiO_2). Od prirodne sirovine se formira gusta pasta koja se obrađuje u željeni oblik i očvršćuje se na sobnoj temperaturi, a zatim se peče na visokoj temperaturi (oko 1400 °C) kako bi se dobila čvrsta i neelastična struktura.

Porcelan se široko koristi za izolatore i prolazne izolatore u elektroenergetskom sistemu pre svega zbog velike postojanosti i mehaničkih osobina. Porcelan koji ima primenu u visokofrekventnim objektima sadrži jedinjenja barijuma ($\text{BaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). [28] Specifična otpornost keramičke izolacije je relativno niska dok je tangens ugla gubitka relativno visok. Temperaturne zavisnosti specifične otpornosti i tangensa ugla gubitka se značajno povećavaju sa temperaturom. Mehaničke osobine porcelana (tvrdoća, žilavost i druge) u poređenju sa drugim čvrstim izolacionim materijalima su manje povoljne, ali su postojane u širokom temperaturnom opsegu.

Zbog svoje hidrofilne površine porcelan nije pogodan za eksploataciju u uslovima visoke kontaminacije česticama i vlažne sredine. Vлага rastvara deo čestica kontaminacije površine i gradi provodne elektrolite čime se smanjuje ukupni površinski otpor. Takva situacija se posebno razvija u vlažnim uslovima (magla, rosa ili slaba kiša) kada se voda lako taloži i zadržava na zagađenoj površini izolatora. To dovodi do površinskog pražnjenja i početka formiranja puznih staza na mnogo nižim naponima od projektovanih.

Time se potiru sve dobre osobine porcelana kao što su hemijska stabilnost porcelana, rezistentnost na starenje i druge, jer dolazi do stvaranja novog postojanog površinskog sloja od vlage i kontaminacije koji ima niske napone preskoka i formiranja puznih staza.

2.1.1.2. Staklo kao izolacioni materijal

Staklo se od početka koristi kao izolacioni materijal, u raznim oblicima i kombinacijama. Glavni sastojak stakla je silicijumdioksid SiO_2 , dostupan u prirodi u obliku kvarca. Veliki broj metaloksida, na primer, olova, aluminijuma, natrijuma, barijuma, kalijuma i dr. pruža mogućnost proizvodnje više od 500 vrsta stakla. Međutim, za upotrebu u elektrotehnici su pogodna samo „nealkalna stakla” odnosno stakla koja imaju alkalni sadržaj manji od 0,8%. Odlikuju se visokom specifičnom otpornošću što rezultuje time da su gubici u takvom staklu niski. Posebna vrsta stakla, takozvano E - staklo, koje ima ista svojstva kao nealkalno staklo, koristi se za proizvodnju staklenih vlakana (*fiberglass*) koja se koriste za ojačavanje nekih plastičnih materijala kako bi se dobila dobre mehaničke osobine. Tako nastaju trake (plastični nosač sa staklenim vlaknima) koje se koriste se u električnim mašinama i kao kalupi za izolovane kontejnere, šipke i tako dalje. [10]

2.1.2. Polimerni plastični organski materijali

U elektrotehnici se koriste čvrsti organski polimerni materijali, prirodni ili veštački. To su pre svega papir, drvo, vosak, koža, kao i niz prirodnih i sintetičkih smola zatim različitih guma i plastičnih materijala.

Tradicionalni izolacioni materijal je drvo. Koristi se od početka kao konstrukcioni izolacioni materijal. Međutim kako je drvo higroskopno nije odgovaralo savremenim zahtevima, ali su ga vratile u upotrebu savremene tehnologije obrade.

U savremenoj elektrotehnici, po broju u masovnosti korišćenja, polimeri čine osnovni izolacioni i konstrukcioni materijal. Čine ih polimerni organski izolacioni materijali koji imaju veoma velike molekulske mase i sastoje se od dva ili više polimernih jedinjenja koje su povezane kovalentnim vezama u više strukturnih jedinica. Te strukturne jedinice, lanci molekula i atoma, se ponavljaju u više ili manje pravilnim rasporedima čineći polimernu strukturu proizvoda dovoljno mehanički čvrstom i žilavom kao i otpornom na proboj (visoka dielektrična čvrstoća). Dobijaju se reakcijom jedinjenja monomera koji imaju najmanje dve reaktivne funkcionalne grupe, koje mogu da reaguju pod pogodnim uslovima praveći polimerne lance. Kao sirovina može se koristiti jedan ili mešavina reagujućih monomera. [29]

Početna prednost polimera koja je privlačila istraživanja i razvoj je njihova gustina koja je mnogo niža od keramike. Otuda su proizvodi od polimera mogli biti znatno lakši i za rukovanje i za ugradnju i čineći izvedene objekte i strukture znatno ekonomičnijim. U početku primene i tehnologije polimera u elektrotehnici, proizvodi od polimera nisu bili konkurentni po pitanju fizičko-mehaničkih svojstava i očekivanog životnog veka koji se zahteva za sve komponente i uređaje od najmanje četrdeset godina. To se prvenstveno

odnosilo na površinske uticaje UV zračenja, kontaminacije, vlage i drugih uticaja. Kasnije, sa razvojem nauke o materijalima i tehnologije razvijeni su polimeri visokih performansi pogodnih za upotrebu u elektrotehnici. To je dovelo do ekspanzije upotrebe u elektrotehnici različitih polimera za spoljašnju i unutrašnju izolaciju i konstrukcijama kao što su kablovi, završnice kablova, izolacija sabirnica, odvodnici prenapona, zatim potporni, noseći i prolazni izolatori. [11] Jedna od značajnih osobina polimera koja ih preporučuje kao savremeni elektrotehnički materijal je njihova otpornost na vlagu i hidrofobnost, što eliminiše potrebu nanošenja hidrofobnih premaza. Kod polimernih proizvoda vlaga na površini formira vodene kapljice čime provodna kontaminacija rastvorena unutar vodenih kapljica postaje diskontinualna. Samim tim je niža površinska struja puzanja i veća otpornost na puzne staze i preskoke jer je povećana verovatnoća formiranja suvih puznih traka.

Klasifikacija polimernih materijala se može napraviti po više kriterijuma u zavisnosti od osobina koje se posmatraju: razne rezistivnosti na uticaje, razne reakcije na uticaje i dr. Jedan od važnijih kriterijuma za klasifikaciju polimera je termički uticaj, pa se polimeri mogu podeliti u dve grupe: termoplastični polimeri i termoreaktivni polimeri.

2.1.2.1. Termoplastični polimeri

Za termoplastične polimere može se reći da su otporni na zagrevanje i hlađenje u ciklusima, bez trajnih nepovratnih posledica na strukturu. Pri tome postoje određen ograničenja i na povišenim temperaturama mogu se uočiti efekti starenja ili destrukcije. Oni omekšavaju pri zagrevanju i postaju gipki i očvršćuju pri hlađenju. Polimeri koji spadaju u ovu kategoriju uglavnom imaju linearnu strukturu makromolekula. [30] Svi monomeri koji imaju reaktivnost jednaku dva, daju linearne polimere i, prema tome, termoplastične materijale. Sintetički termoplastični polimerni materijali koji se koriste u elektrotehnici za potrebe izolacije su: polietilen (PE), polivinilhlorid (PVC), polipropilen (PP) i poliamid (PA). Navedeni redosled vrsta materijala je korespondentan sa obimom upotrebe u elektrotehnici.

2.1.2.2. Termoreaktivni polimeri

Termoreaktivni polimeri su „poluproizvod“ karakterističan po reakcijama poprečnog (unakrsnog) umrežavanja polimernih lanaca pod dejstvom datog zagrevanja kojim se želi postići određena forma. Ova reakcija, koja dovodi do formiranja mrežne strukture, je takođe poznata kao očvršćavanje ili vezivanje polimera. Monomeri koji imaju više od dve reaktivne grupe mogu da formiraju mrežnu strukturu. Treba naglasiti da polimeri koji se koriste u svrhu električne izolacije treba da zadrže svoje elastične (gumene) osobine, odnosno da budu iz grupe takozvanih „lako umreženih polimera“.

Pospešivanje hemijske reakcije koja dovodi do unakrsnog povezivanja se postiže uz pomoć različitih aditiva (agenasa). Kao „sredstva za umrežavanje“ koriste se: [10]

- molekuli koji premošćuju dva polimerna molekula kao što su vulkanizacioni agensi (sumpor, selen i sumpor-monohlorid) za gume i poliamini u epoksidnim smolama;
- molekuli koji iniciraju reakciju unakrsnog povezivanja kao što su peroksidi kod polimerizacije dvostruke veze u poliesterima i dikumil peroksid u polietilenu niske gustine (LDPE);
- molekuli kao katalizatori kao što su kiseline za fenolne smole i amini u epoksidima;
- molekuli kao generatori aktivnih mesta u polimerima kao što su peroksidi koji izdvajaju protone iz polimernih lancaca.

Različiti materijali od umreženih polimera mogu značajno da se razlikuju po termičkim, mehaničkim i električnim svojstvima. Generalno, posle umrežavanja materijal ne omekšava pri ponovnom zagrevanju već postaje termički relativno stabilan u poređenju sa termoplastičnim materijalima.

Umrežene polimerne smole su poliesterna, fenolna, silikonska i epoksidna smola koja se najčešće koriste u elektrotehnici. Za gumene materijale u elektrotehnici tipični primeri su prirodna guma, poznata i kao „indijska guma“ i veliki broj sintetičkih guma kao što su silikonska guma (SiR), etilen-propilenska guma (EPR) i tako dalje. Umreženi polietilen (XSLPE) se sada intenzivno koristi za električne kablove do najviših napona.

2.1.2.3. Polimerna jedinjenja.

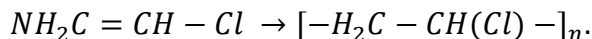
Osnovne karakteristike polimera mogu biti prilagođavane dodavanjem niza različitih (biranih) aditiva čime se mogu proizvesti veoma različite karakteristike proizvoda. Ova tehnologija se posebno široko koristi za PVC materijale. Aditivi se mogu podeliti u nekoliko grupa u pogledu funkcija koje se postižu:

- Punioči: primenjuju se za modifikaciju fizičkih (mehaničkih) svojstava polimera;
- Plastifikatori i omekšivači: primenjuju se za snižavanje viskoziteta rastopa i za promenu fizičkih svojstava (mekoća, elastičnost, ...);
- Boje: primenjuju se za označavanje, koriste se normalno rastvorljive boje (bojila);
- Aditivi protiv starenja: primenjuju se za sprečavanje degradacije strukture usled hemijskih reakcija poput oksidacije, izloženosti ozonu, izloženosti ultraljubičastom zračenju (sunce);
- Usporivači plamena: koriste se za poboljšanje stepena otpornosti polimera na plamen.

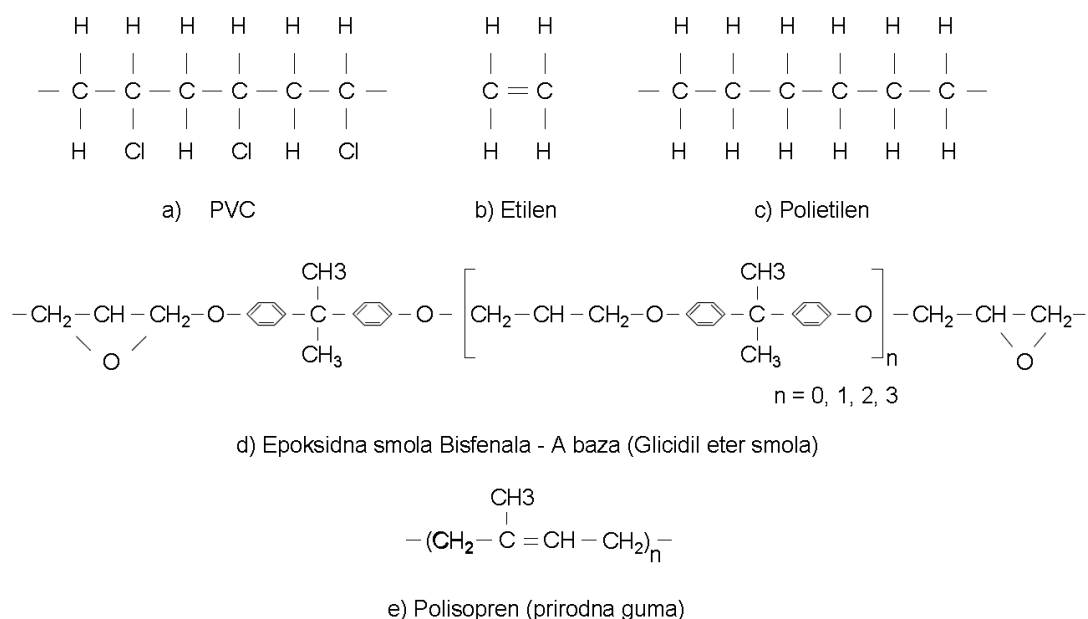
2.1.2.4. Sredstva za umrežavanje

Koriste se za postizanje intermolekularne kombinacije na krajevima lanca polivinil hlorida. Polivinil hlorid je plastomerni material, materijal koji se pod opterećenjem lako deformiše i nakon rasterećenja ostaje delimično deformisan, za razliku od elastomernih materijala. Formiran je od linearnih i razgranatih makromolekula opšte formule $-(-CH_2 - CHCl -)_n -$. Proizvodi se postupkom koji se naziva „suspensionni postupak polimerizacije“ koji se odvija u zatvorenom proizvodnom sistemu. Tečni vinil-hlorid (monomer) disperguje se u demineralizovanoj vodi i polimerizuje se pomoću pokretača

polimerizacije uz dodatak sredstava za održavanje stabilnosti suspenzije. Moguće su reakcije i u rastvorima, emulzijama i drugo. Pokretači svojim raspadom iniciraju polimerizaciju vinil-hlorida pri temperaturama od 50°C do 70°C i pritisku od 7 bara do 13 bara, po relaciji: [10] [31] [32]



Svojstva PVC materijala se mogu menjati ugradnjom drugih monomera tokom polimerizacije, npr. vinil-acetata ili viniliden-hlorida, a i dodatkom mnogobrojnih stabilizatora, omekšivača (plastifikatora) i punila. Poznato više od stotinu PVC modifikacija sa širokom rasponom svojstava, od tvrdoga i žilavoga do mekanog i elastomernog materijala, među kojima su kruti i savitljivi poli(vinil-hloridi) dve temeljne vrste. Na Sl. 2.1 data je molekularna struktura nekih polimera.



Sl. 2.1 Molekularna struktura nekih polimera [10]

Osnovni PVC materijal čine polarni molekuli koji ga čine prozirnim, veoma tvrdim i nepodesnim za obradu kao i termički nestabilnim. Pored toga kruti poli(vinil-hlorid) je vrlo otporan na uticaj atmosferskih gasova, i ima dobra dielektrična svojstava. Proširenje diapazona upotrebe PVC materijala čini se dodavanjem drugih materijala. Tako PVC jedinjenja sadrže omekšivače, stabilizatore i punila, pored sredstava za bojenje i zaglađivanje.

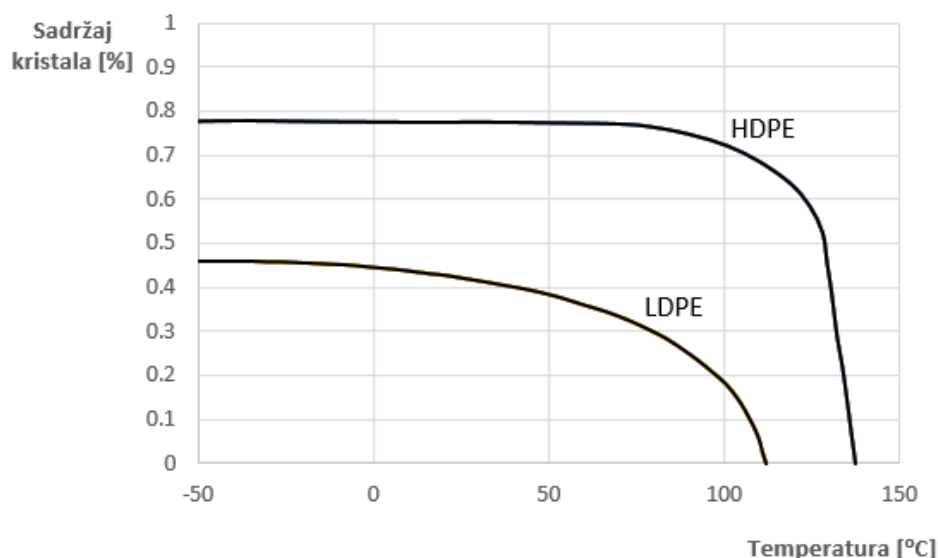
Elastični poli(vinil-hlorid) sadrži od 20% do 30% omekšivača (najčešće estara dikarboksilnih kiselina, npr. dioktil-ftalata). Pri tome treba voditi računa da se sa povećanjem udela omekšivača smanjuje prekidna čvrstoća, modul elastičnosti i tačka ostakljavanja a povećava se prekidno istezanje i udarna žilavost, te se poboljšavaju sveukupna mehanička svojstva pri nižim temperaturama. Takođe se podiže stepen različitih obrada materijala. Tako na primer, masa za izolaciju kablova može da sadrži oko 68% PVC polimera, 28% plastifikatora, neisparljivih rastvarača za PVC kao što su diizo - oktil ftalat (DIOP), di - 2 - etilheksil ftalat (DOP) itd, 3% stabilizatora kao što su olovo - sulfat i olovo - ftalat i oko 1% sredstva za bojenje i drugih aditiva posebne namene.

Stabilizatori su korisni za poboljšanje otpornosti PVC na vremenske uticaje, posebno protiv UV degradacije. U normalnim materijalima za potrebe električne izolacije se koristi trobazni olovni sulfat a dvobazno olovo ftalat se koristi u materijalima sa povišenom toplotnom otpornošću izolacije. [31] Kreda prah ili porculanska glina se koristi u različitim proporcijama samo kao punilac za mase za oblaganje. Za glatkoću i olakšanu ekstruziju mase dodaju se sredstva poput tvrdog voska.

2.1.2.5. Polietilen (PE)

Polietilen je polimer proizveden polimerizacijom monomera etilena. Molekularna struktura monomera etilena i polietilena je prikazana na Sl. 2.1 (c). Polietilen se proizvodi pomoću dva različita procesa, odnosno „na niskom pritisku“ i „na visokom pritisku“, klasifikovani prema visini pritiska koji se primenjuje se u postupku proizvodnje. Proces „niskog pritiska“ uključuje polimerizaciju etilena u prisustvu katalitičkog agensa (Ziegler - Natta) na oko 100°C i na nekoliko bara. PE proizveden ovom metodom poznat je kao „PE visoke gustine“ (HDPE), koji imaju gustinu između 0,94 g/cm³ i 0,98 g/cm³ i ima relativno viši sadržaj kristala koji utiču na njegove mehaničke osobine. U procesu „visokog pritiska“ polimerizacija se postiže na oko 200°C i pritisku između 150 bara i 300 bara uz malu količinu kiseonika kao katalizatora. Proizvod dobijen ovom metodom je veoma razgranate strukture i poznat je kao „PE niske gustine“ (LDPE), koji ima gustinu između 0,91 g/cm³ i 0,92 g/cm³, ima mnogo niži sadržaj kristala i drugačije mehaničke osobine u poređenju sa HDPE. [32]

Kristalni sadržaj PE materijala se menja sa temperaturom materijala. Na Sl. 2.2 data je varijacija kristalnog sadržaja sa temperaturom različitih uzoraka od PE visoke i niske gustine. [10] [32] Kako se vidi sa grafika zavisnosti, PE visoke gustine zadržava svoje kristalne karakteristike do oko 110°C pri čemu se dešava veoma nagli pad kristalnog sadržaja sa premašenjem ove temperature. U slučaju uzoraka male gustine PE, smanjenje kristalnog sadržaja počinje na -20°C i nastavlja se do oko 115°C, što je tačka početka topljenja materijala. Ove karakteristike pokazuju da PE ima loša termička svojstva i temperatura opreme koja sadrži HDPE i LDPE komponente ne bi trebalo da pređe 70°C.



Sl. 2.2 Efekat temperature na kristalizaciju PE [10] [32]

Korišćenje PE materijala u proizvodnji kablova je uglavnom ekstrudiranjem PE mase oko provodnika, pri dovoljno visokim temperaturama. Za date temperature proizvodnje i sobnu temperaturu materijal se skuplja oko 15% pa su moguća unutrašnja naprezanja i mehaničke pukotine. Smanjenje ovih defekata se postiže postepenim kontrolisanim hlađenjem do sobne temperature. Afinitet PE materijala za vezivanje vlage je vrlo nizak ali može da bude propusan za vodenu paru. U cilju poboljšanja termičkih i mehaničkih svojstava PE, vrši se hemijsko umrežavanje molekula PE izolacije. LDPE, u osnovi termoreaktivni materijal, uglavnom se koristi za dobijanje izolacije od umreženog polietilena (XLPE). Materijal od XLPE je u stanju da izdrži kontinuiranu temperaturu od 90°C i kratkotrajnu temperaturu kvara od čak 250°C.

Postoji više postupaka i procesa kojima se može postići umrežavanje ili vulkanizacija materijala od PE koji se koristi za primenu izolacije kablova.

a) Hemijski procesi umrežavanja

U hemijskom procesu u LDPE izolacionu masu pod visokim pritiskom i temperaturom se dodaju sredstva za pospešivanje hemijske reakcije unakrsnog povezivanja (umrežavanja), kao što je dikumil peroksid (DCP). Molekuli peroksida se raspadaju na povišenoj temperaturi stvarajući slobodne radikale koji zatim vezuju vodonik iz polimernog lanca PE proizvodeći slobodne radikale polimera. Dva radikala iz dva lanca se kombinuju dovodeći do ukrštenih veza, umrežavanja. [32]

U industriji energetskih kablova razvijena su tri različita procesa za očvršćivanje (umrežavanje) PE uz korišćenje peroksida:

- „mokro očvršćavanje”, pod visokom temperaturom i pritiskom pare,
- „suvo očvršćavanje”, pod visokom temperaturom i pritiskom gasa (azota),
- „očvršćavanje uljem”, pod visokom temperaturom i pritiskom silikonskog ulja.

b) Procesi umrežavanja zračenjem

Umrežavanje PE se može postići raznim zračenjima koji mogu dovesti do generisanja slobodnih radikala. To je moguće postići elektronima, x zracima, gama zracima i drugim izvorima. U praksi se obično postiže uz pomoć izvora na bazi kobalta $^{60}\text{Co}_{27}$ koji je izvor elektrona (beta zračenje) i gama zračenja. Zbog svojih osobina i dostupnosti moguće ga je primenjivati za velike objekte i masovnu proizvodnju, uz potrebnu opremu i zaštitne mere. Najviše komercijalnih iskustava ima u SAD, ali samo za energetske kablove za srednji napon do 33 kV. Za veće mase izolacije odnosno više napone ova metoda nije uspešna jer je dubina kvalitetnog umrežavanja ograničena. [10]

c) Procesi umrežavanja silanima

U kasnim 1960-im uvedena je tehnologija za umrežavanje polietilena korišćenjem organo funkcionalnih silana čime se dobio materijal SXLPE. Od ranih 1970-ih, silani se koriste za unakrsno umrežavanje u proizvodnji XLPE cevi i energetskih kablova. [33] Ova tehnologija uključuje uglavnom tri reakcije; kalemljenje silana, $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ na PE, hidroliza silanske grupe i kondenzacija da bi se formirale Si - O - Si veze između PE molekula. Za iniciranje umrežavanja preko kalemljenja koristi se organski peroksid a kao katalizator umrežavanja koristi se kalaj. Proces unakrsnog umrežavanja i očvršćavanja se odvija odležavanjem kabla u toploj vodi ili parnom kupatilu.

Materijal SXLPE, takođe poznat kao Sioplast materijal, je tvrd zbog uvođenja silicijuma. Stoga se može koristiti za kablove otporne na habanje. SKSLPE tehnologija do sada se primenjuje samo za niskonaponske kablove (do 33 kV) u mnogim zemljama. [34] Zbog jednostavnije i dostupne tehnologije ima relativno nižu cenu.

2.1.3. Ostali polimerni organski materijali

Pored pomenutih organskih plastičnih jedinjenja koji su polimeri, postoji i niz drugih polimernih organskih materijala koji se koriste u elektrotehnici. U prvom redu to su epoksidne smole, prirodne i sintetičke gume, celulozni materijali i drugi.

2.1.3.1. Epoksidne smole (EP)

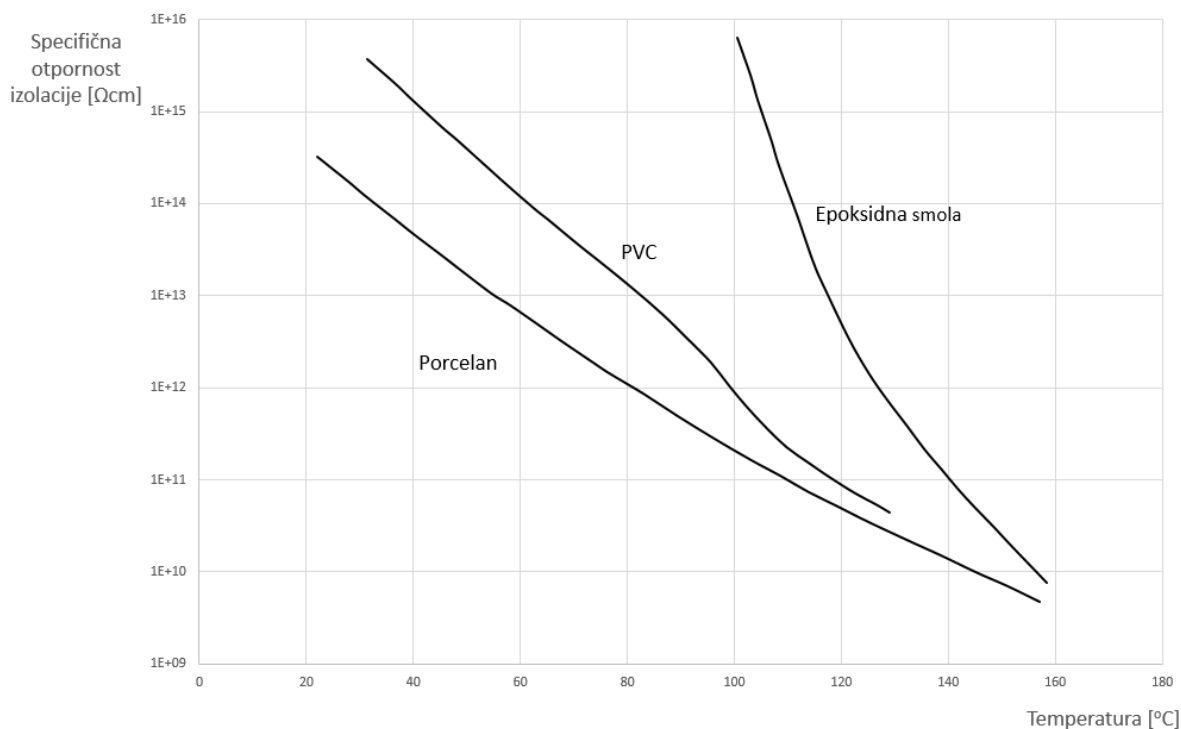
Pojam epoksid se odnosi na jedinjenja koja sadrže više od jedne epoksidne grupe po molekulu, odnosno kiseonički atom sjedinjen sa dva atoma ugljenika koja su već spojena na neki drugi način. Prirodna smola je ugljovodonična smeša koja nastaje kod pojedinih biljaka, a posebno kod četinara. U zavisnosti od ambijentalne temperature i starosti može biti tečna ili čvrsta. Fosilna smola je poznata pod imenom ćilibar. U elektrotehnici se češće koriste smole nastale hemijskom obradom neorganskih materijala. Epoksidne smole su nisko molekularne, relativno lako rastvorljive i termoreaktivne. Osnovna smola je plastična i mekana pa se meša sa agensima za očvršćavanje i bojenje. Time se dobijaju materijali za ispune i vezivanja. Za poboljšavanje elektromehaničkih osobina epoksidnih smola koristi se hemijsko umrežavanje. Najčešće se koriste katalizatori ili hidroksilne grupe, na normalnoj temperaturi. Ponekad se procesi očvršćavanja i umrežavanja objedinjuju koristeći iste aditive. Kada se za očvršćavanje

epoksidnih smola koriste razne anhidrid kiseline potrebne su relativno visoke temperature očvršćavanja (iznad 100°C) i livenje zahteva duže vreme (reda dana). Sa druge strane, kada se koriste aaminski očvršćivači proces očvršćavanja se odvija skoro spontano na sobnoj temperaturi i relativno brzo. Epoksidne smole su pogodne za dobijanje širokog spektra električnih, hemijskih i fizičkih osobina različitih proizvoda korišćenjem različitih očvršćivača. [31]

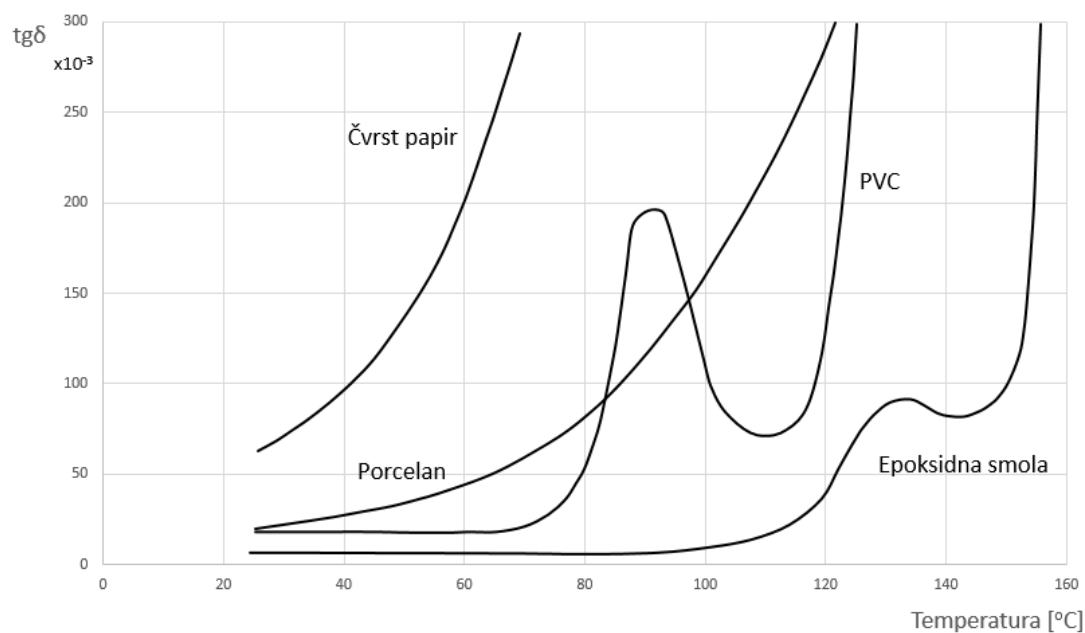
Prilikom formiranja objekata od epoksida procesom livenja, kao materijali za ispunu koriste se neorganske supstance, a najčešće kvarcni prah (SiO_2). Za neke posebne namene u sistemima izolovanim gasom SF_6 (kao što je GIS) koriste se odstojnici od epoksidne smole dobijeni pomoću punilaca od praha aluminijumoksida (Al_2O_3) ili dolomita (Ca-M-karbonat). Sa ovim puniocima odstojnici su otporniji na erozije izazvane lučnim i parcijalnim pražnjenjima. [31] [35] U slučajevima kada je potrebna veća fleksibilnost predmeta dodaju se razni materijali kao što su poliamidi, polisulfidi, poliamini i poliglikol diepoksidi.

Za upotrebu kod visokonaponskih objekata veoma je važno da odlivak bude homogen, da ne sadrži šupljine i vlagu. U najzahtevnijim slučajevima odlivanje se vrši u vakuumu a za manje zahtevne odlivke primenjuje se livenje sa mešanjem uz sušenje i degazaciju.

Epoksidne smole su rezistivne na etre, alkohole i benzol. Međutim, većina njih se rastvara u mineralnim uljima na oko 70°C . Zbog toga nisu pogodni za primenu u transformatorima punjenim uljem. Epoksidne smole, u osnovi nepolarne supstance, imaju visoku jednosmernu specifičnu izolacionu otpornost i mali tangens gubitaka u poređenju sa polarnim materijalima kao što je PVC. Međutim, iznad 100°C specifična otpornost izolacije počinje znatno da opada i $\text{tg}\delta$ se povećava (Sl. 2.3 i Sl. 2.4). Talasna varijacija na krivi tangensa ugla gubitaka sa povećanjem temperature pripisuje se gubicima polarizacije. U poređenju sa porcelanom, čvrstoća epoksidnih smola je približno dvostruko veća na temperaturama do 100°C ali brzo pada na višim temperaturama.



Sl. 2.3 Specifična otpornost izolacije u funkciji temperature za različite čvrste materijale [10]



Sl. 2.4 Promena ugla gubitaka $tg \delta$ u funkciji temperature za različite čvrste materijale pri naizmeničnom naponu, 50 Hz [10]

2.1.3.2. Prirodna i sintetička guma

Guma je visoko fleksibilan polimer „poliizopren“, koji se proizvodi ili od prirodne ili od sintetičke supstance „kaučuk“. Prirodni kaučuk, dobijen od kaučukovog drveta, poznat je i kao indijski kaučuk koji se uzgaja uglavnom u Indiji i drugim zemljama jugoistočne Azije. Izopren je strukturalna jedinica prirodnog kaučuka prikazana na Sl. 2.1(e).

Guma, kao sirovina, je linearno lančano jedinjenje i ako takvo ima niz nedostataka. Osobine se poboljšavaju poprečnim umrežavanjem (vulkanizuju) pomoću sumpora, na povišenoj temperaturi. Izbor smeše od različitih osnovnih materijala u određenim proporcijama i zatim izborom različitog stepena vulkanizacije dobijaju se proizvodi različitih svojstava. Guma generalno, ima slabija električna svojstva, slabije čak i od smola, a kritično električno polje se može porediti sa porcelanom. Za električnu upotrebu koriste se proizvodi od gume dobijene od sintetičkog kaučuka jer poseduju bolja električna i termička svojstva u poređenju sa proizvodima od prirodnog kaučuka. Tako na primer, kopolimerizacijom butadiena (C_4H_6) sa stirenom (C_6H_5CH) se dobija sintetička guma „stiren-butadien kaučuk” (SBR), poznata po trgovačkom nazivu kao „Buna S”. Kopolimerizacijom sa akrilom dobija se proizvod poznat kao „Perbunan”. Slično, od izomernog ugljovodonika butilena (C_4H_8) sa izoprenom (C_5H_8) dobija se proizvod poznat kao „butil kaučuk” a od silikonaučuka „silikon” i guma (SiR) i etilen – propilen – kopolimer guma (EPR). EPR jedinjenja sadrže samo oko 50% osnovnog polimera. Ovo su složene formulacije koje sadrže čak deset sastojaka, a glineni punioci čine sledeću najveću komponentu. Ove formulacije se razlikuju od proizvođača do proizvođača. Tipično jedinjenje obično ima sastojke: EP guma, punilo/agens pojačavč, plastifikator, antioksidansi/stabilizatori, usporivač plamena, očvršćivači i sredstva za vulkanizaciju. [36] [37]

Među gore navedenim proizvodima, EPR i SiR su otporniji na atmosferske uslove, kao što su svetlost, kiseonik, ozon kao i na starenje sa vremenom generalno. Sa druge strane loša osobina je niska postojanost na ulja. Nedavna istraživanja pokazuju da EPR ima bolju otpornost na nuklearno zračenje u poređenju sa drugim polimerima. Tako su ovi gumeni proizvodi našli široku primenu u specijalnim visokonaponskim namenskim energetskim kablovima koji se koriste u rudarstvu, brodarstvu i nuklearnim elektranama. A nova oblast primene SiR-a je za plaštovi koji se nalaze na visokonaponskim plastičnim izolatorima ojačani fiberglasom. [35]

2.1.3.3. Kompozitni izolacioni materijali

Kompozitni materijal (kompozit) se formira od međusobno čvrsto spojenih različitih materijala, organskih i neorganskih, radi dobijanja novog materijala sa izrazito poboljšanim fizičkim i hemijskim osobinama, u ovom slučaju elektroizolacionim, u odnosu na sastavne komponente. Po pravilu, kompozit sadrži jedan materijal kao nosač (matricu), na koju se dodaju drugi materijali kao ojačanja svojstava. Izbor materijala za kompozit omogućuje dobijanje programiranih osobina, u skladu sa zahtevima. Za primenu u elektrotehnici od interesa su kompoziti ojačani vlaknima ili česticama i laminate. [10]

Kompoziti ojačani vlaknima sadrže osnovu, matricu, u koju su ugrađena čvrsta, kruta ili krhka vlakna. Električna i mehanička naprezanja se s matrice prenose na vlakna kao osnovne nosioce. Matrica je obično polimerna (poliester, vinil estera ili epoksidna smola), a ojačava se staklenim vlaknima. Tako dobijen kompozit može da ima, u smeru vlakana, zateznu čvrstoću približno jednaku čeliku, ali je od njega desetinu puta lakši.

Kompoziti ojačani česticama sadrže matricu u koju se ugrađuju čestice koje doprinose poboljšanju traženih električnih karakteristika. Razlikuju se kompoziti s velikim česticama kao što su listići liskuna ili kompoziti s disperzijom vrlo malih čestica (reda od 10 do 250 nm) kao što su mešavine finih zrna kvarcnog peska.

Laminati su slojevi materijala slagani i međusobno povezani organskim lepkom. Lepljeni laminati imaju malu masu, dobru udarnu žilavost, korozionu otpornost i izolaciona svojstva.

Posebna vrsta kompozitnih materijala su impregnirani materijali. Postupak impregnacije se sprovodi na poroznim matricama koje se ispunjavaju organskim ili neorganskim uljima. Time se postižu posebna svojstva, u zavisnosti od materijala matrice i od impregnanta.

Papir je jedan od najranijih oblika kompozitnog dielektrika koji se koristi u visokonaponskoj tehnici od kraja devetnaestog veka. Papir kao takav ima veoma loša dielektrična svojstva, ali kada je impregniran uljem ili nekim impregnirajućim jedinjenjem, svojstva kompozitnog dielektrika značajno se poboljšavaju.

Papir koji se koristi u elektrotehnici je proizvod od „celuloze“ dobijene uglavnom od sulfatne pulpe drveta bora ili smrče koja se nalazi u Skandinaviji. Celuloza je složeni ugljeni hidrat, koji čini glavni sastojak ćelijskih zidova biljaka. Forma ćelijskog tkiva papira se sastoji od kristalnih mikro ćelija između slojeva pojedinačnih molekula celuloze. Papir ima inherentnu strukturu ispunjenu mikro prazninama prosečnog prečnika kapilara od 10^{-1} do 10^{-2} μm . Efektivna unutrašnja površina papira je, dakle, veoma velika i visoko higroskopna. Papir proizveden za primenu u elektrotehnici je napravljen ekstra glatkim. Papir koji se koristi za kondenzatore je ekstra tanak i ima debljinu od 10 do 30 μm . Za transformatore i kablove, obično se primenjuje papir debljine 80 do 130 μm . Željena debljina sloja sastavljena od tanjeg papira ima veću električnu izdržljivost. Sa tačke gledišta električne izolacije, papir kao takav se može opisati kao konsolidacija vazдушnih kondenzatora i celuloznih dielektrika. Relativna permitivnost i tangens gubitka papira je, dakle, mnogo manji od tangensa čiste celuloze ($\epsilon_r=6,1$ na 20 °C). [10]

3. ELEKTRIČNE OSOBINE ČVRSTIH IZOLACIONIH MATERIJALA

Električne osobine izolacionih materijala se utvrđuju u laboratorijskim ispitivanjima. Ta ispitivanja se vrše na posebno pripremljenim uzorcima, i samim tim značajno se razlikuju od ispitivanja izolacionih sistema. Najznačajnije veličine koje karakterišu dielektrične materijale su: [9]

- relativna dielektrična permitivnost (ϵ_r),
- specifična električna otpornost (ρ),
- faktor dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$),
- dielektrična čvrstoća $D\check{C}$, (E_{kr}).

3.1. Dielektrična permitivnost

Dielektrična konstanta ili permitivnost vakuumu (oznaka ϵ_0) je prirodna konstanta koja pokazuje odnos između dielektričnog pomeraja $\vec{D}$ i vektora jačine električnog polja u vakuumu $\vec{E}_0$:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0$$

gde je $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$. Dielektrična konstanta materijala se izražava kao proizvod relativne dielektrične konstante ϵ_r za dati materijal i dielektrične konstante vakuumu ϵ_0 ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$):

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

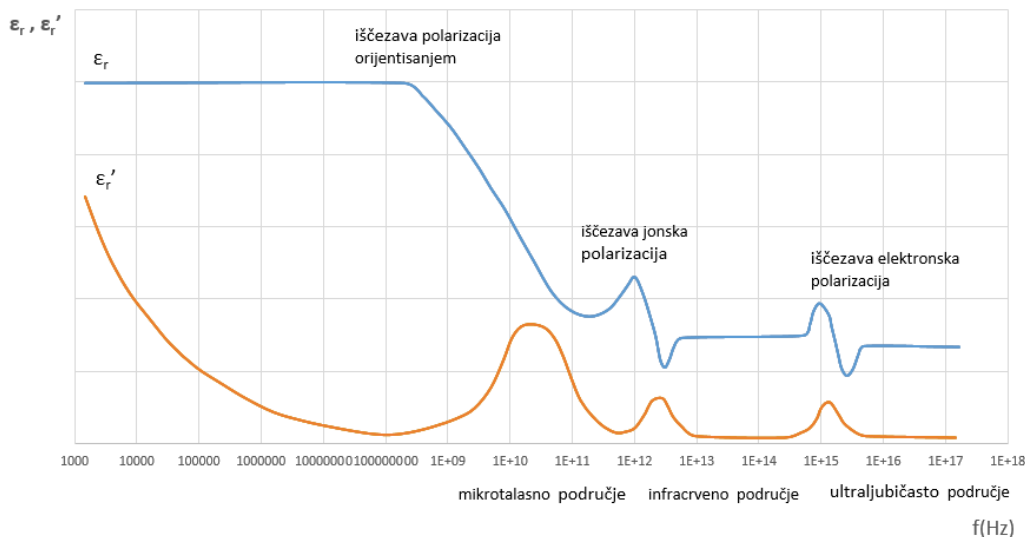
Može se uočiti da električna indukcija ne zavisi od materijala a da se električno polje u materijalu smanjuje ϵ_r puta u odnosu na električno polje u vakuumu.

Relativna dielektrična konstanta zavisi od vrste strukture materijala i u suštini određuje sposobnost da se polarišu elektronski oblaci odnosno molekuli u električnom polju. Tako se mogu razlikovati nepolarni dielektrici kod kojih je ϵ_r približno 1, i polarni dielektrici kod kojih je ϵ_r veće od 1. Procesi polarizacije su složeni i zavise od jačine električnog polja i uslova u kojima se dielektrik nalazi. U principu, ϵ_r opada sa porastom frekvencije i raste sa porastom temperature. Pri tome se mogu uočiti svojevrsni „fazni prelazi“ dielektrične konstante odnosno primetne su skokovite promene. [9]

U Tab. 3.1 date su relativne dielektrične konstante (ϵ_r) za različite materijale. Uslovi su sobna temperatura a frekvencija pobudnog naponu je 1 kHz. Na Sl. 3.1 data je zavisnost kompleksne dielektrične konstante dielektrika $\epsilon_r^*(\epsilon_r, \epsilon_r')$ od frekvencije. [38] [39]

Tab. 3.1 Relativne dielektrične konstante (ϵ_r) različitih materijala na sobnoj temperaturi i pri frekvenciji od 1 kHz. [38] [39]

materijal	ϵ_r
vakuum	1 (po definiciji)
vazduh	1,000,589,86±0,000,000,50 [1]
teflon	21
beton	45
staklo	47 (3.7–10)
guma	7
dijamant	5.5–10
so	3–15
grafit	10–15
silikon	1.168
metanol	30
glicerol	41.2, 47, 42.5 (0, 20, 25 °C)
voda	87.9, 80.2, 55.5 (0, 20, 100 °C) za vidljivu svetlost: 1.77

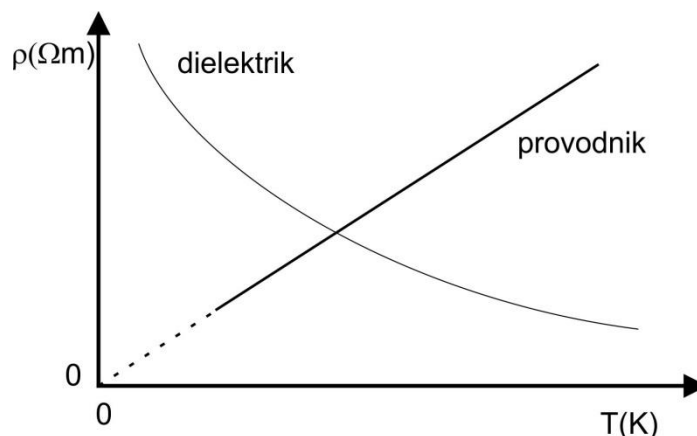


Sl. 3.1 Zavisnost kompleksne dielektrične konstante $\epsilon_r^*(\epsilon_r, \epsilon_r')$ od frekvencije [9]

3.2. Specifična električna otpornost

Specifična otpornost materijala je veličina koja karakteriše „curenje“ struje kroz izolacioni materijal kao posledica njegovih fizičko hemijskih osobina. Nosioi naelektrisanja su joni i elektroni, a procesi transporta naelektrisanja su vrlo složeni i zavise od niza činilaca (vrste materijala, tehnologije proizvodnje, tehnologije izrade izolacionog sistema, jačine električnog polja, frekvencije, aktivacione energije elektrohemijskih procesa, radne

temperature, pritiska, vlage i niza drugih. Na Sl. 3.2 data je tipična promena specifične električne otpornosti u zavisnosti od temperature za provodnike i dielektrike.



Sl. 3.2 Zavisnost specifične električne otpornosti od temperature [9]

3.2.1. Specifična (ρ_v) i površinska (ρ_p) električna otpornost

U dielektričnom materijalu izloženom vremenski nepromenljivom električnom polju, nakon završetka procesa polarizacije, postoji samo kondukciona struja. Proces polarizacije za većinu dielektričnih materijala traje kraće od 10^{-12} sekundi [7].

U tečnim i čvrstim dielektričnim materijalima kondukciju struju čine površinska i_p i zapreminska i_v komponenta. Na osnovu merenih veličina izračunavaju se određeni otpori iz kojih se uračunavanjem dimenzija (i oblika) dobijaju specifična i površinska električna otpornost. [9]

Specifična (zapreminska) električna otpornost ρ_v čvrstih dielektričnih materijala zavisi od temperature, vlage, hemijskog sastava i primesa, jačine električnog polja itd, i ima odlike specifičnosti za dati materijal.

Na površinsku električnu otpornost ρ_p čvrstih dielektričnih materijala utiče interakcija površine materijala i vlage (relativna vlažnost okoline), poroznost materijala, čistoća i poliranost površine itd. Ova veličina nema odlike specifičnog, jer jako zavisi od okruženja.

3.3. Dielektrični gubici

Dielektričnim gubicima naziva se onaj deo električne energije koji se u dielektričnom materijalu nepovratno pretvori u druge oblike energije, pretežno u toplotu.

Dielektrične gubitke po načinu nastanka i uzrocima se mogu podeliti na: [9] [28]

- termički (omski) gubici,
- polarizacijski gubici,
- gubici zbog jonizacije i
- gubici zbog nehomogenosti materijala.

Termički gubici javljaju se u svim dielektričnim materijalima čija je električna provodnost veća od nule. Ovi gubici su više izraženi u tečnim i čvrstim nego u gasovitim dielektričnim materijalima.

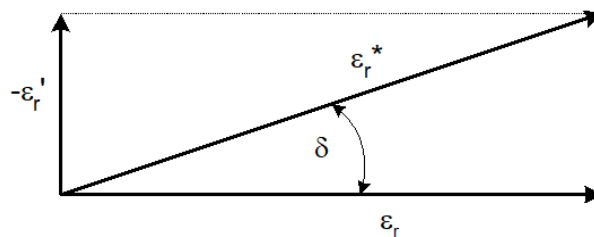
Dielektrični gubici zbog termičkih efekata postoje u vremenski nezavisnim i zavisnim poljima i u idealnom slučaju ne zavise od frekvencije priključenog polja. Ovi gubici znatno rastu sa porastom temperature, jer se pri tome povećava električna provodnost dielektričnih materijala.

Polarizacioni gubici se javljaju u dielektričnim materijalima sa orijentacionom polarizacijom (sa prisutnim permanentnim električnim dipolima) i u nekim materijalima sa jonskom polarizacijom. Spoljašnje električno polje narušava termičko kretanje atoma ili molekula što dodatno zagreva dielektrični materijal. Ovi gubici imaju maksimum na temperaturi karakterističnoj za pojedini dielektrik. U dielektrične gubitke zbog polarizacije spadaju i rezonantni gubici koji nastaju pri određenim frekvencijama priključenog polja.

Dielektrični gubici zbog jonizacije javljaju se pretežno u gasovitim dielektričnim materijalima. U jakim električnim poljima energija se gubi pri jonizaciji molekula ili atoma dielektrika.

Dielektrični gubici zbog nehomogenosti javljaju se u slojevitim dielektričnim materijalima. Zavise od sastava materijala i primesa (nečistoća).

Makroskopska veličina koja je mera dielektričnih gubitaka je snaga dielektričnih gubitaka, odnosno u slučaju sinusne, prostoperiodične vremenske zavisnosti priključenog polja je ugao dielektričnih gubitaka δ , Sl. 3.3.



Sl. 3.3 Ugao dielektričnih gubitaka izražen preko kompleksne dielektrične konstante $\epsilon_r^*(\epsilon_r, \epsilon_r')$ [9]

Definiše se kompleksna relativna dielektrična konstanta ϵ_r^* :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r - j\epsilon_r'$$

gde je ϵ_r realni deo relativne dielektrične konstante koji je mera energije spoljašnjeg električnog polja, a ϵ_r' je imaginarni deo relativne dielektrične konstante koji je mera dielektričnih gubitaka u materijalu pod uticajem spoljašnjeg električnog polja. Za dobre dielektrike važi $\epsilon_r' \ll \epsilon_r$. Prema Sl. 3.3 fazor kompleksne relativne dielektrične konstante ima fazni ugao δ kao ugao dielektričnih gubitaka pomoću koga se definiše faktor dielektričnih gubitaka $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_r''}$$

Kao što je ranije napomenuto, relativna dielektrična konstanta zavisi od frekvencije primenjenog polja, odnosno to važi i za realni i za imaginarni deo dielektrične konstante.

3.4. Dielektrična čvrstoća

Svaki izolacioni materijal ima određeni opseg za svaku karakteristiku od značaja koji zavisi od radnih uslova. Maksimalno podnosivo lokalno električno polje za određeni materijal se naziva dielektrična čvrstoća. Ako jačina lokalnog električnog polja premaši određenu vrednost E_{kr} doći će do drastičnog smanjenja otpornosti dielektričnog materijala, odnosno doći će do **električnog proboja**. Zavisno od vrste materijala i jačine električnog polja procesi predproboja i proboja su različiti. Pri tome oni jako zavise od uslova ispitivanja tako da oni moraju biti precizno kontrolisani prema uslovima standarda. U praksi se ne meri jačina električnog polja već se meri probojni napon U_{pr} iz koga se, pomoću geometrijskih veličina, izračunava kritično električno polje E_{kr} . [9] [10]

Teorijski, ako je dielektrični materijal podvrgnut delovanju napona koji stvara homogeno električno polje onda je dielektrična čvrstoća:

$$E_{kr} = \frac{U_{pr}}{d}$$

Jedinica za dielektričnu čvrstoću u SI bi bila $\frac{V}{m}$ ali ona nije prikladna za realne vrednosti pa se češće izražava kao $\frac{kV}{mm}$, $\frac{kV}{cm}$. U standardizovanim uređajima za merenje dielektrične čvrstoće se postiže kvazihomogeno električno polje pomoću elektrodnog sistema tipa Rogovski.

Proboj čvrstih dielektričnih materijala može nastati kao posledica električnog, elektrotermičkog ili elektrohemijskog proboja. Kod električnog proboja čvrstog dielektrika predprobojni proces je udarna jonizacija u kojoj dominantno učestvuju elektroni i šupljine nastali zbog jakog lokalnog električnog polja. Elektrotermički proboj čvrstog dielektrika je posledica pregrevanja dielektrika zbog dielektričnih gubitaka. To je kumulativni proces koji dovodi do stalnog rasta dielektričnih gubitaka i rasta temperature, koji znatno olakša električni proboj na znatno nižim jačinama polja. Elektrohemijski proboj je složeni proces koji nastaje sinergijskim delovanjem hemijskih procesa u prisustvu električnog polja što dovodi do umnožavanja nosilaca naelektrisanja i na kraju do proboja. U nekim slučajevima jaka električna polja mogu izazvati elektrolizu (razlaganje) materijala, pojavu ozona na površini materijala i sl.

Svi uticaji koji dovode do smanjenja dielektrične čvrstoće, kao što su jako električno polje, visoka temperatura, hemijski procesi i niz drugih, dovode do starenja dielektričnog materijala odnosno do starenja elektroizolacionog sistema.

3.5. Električne osobine važnijih dielektričnih materijala

Važniji čvrsti materijali savremenih izolacionih sistema su polietilen, umreženi polietilen, polivinilhlorid (PVC), silikonska guma, poliuretan (PU), porcelan, papir, epoksidne smole a posebno se karakteriše vazduh kao neizbežno okruženje.

U Tab. 3.2 date su kategorije električnih izolacionih materijala preko vrednosti nekoliko najvažnijih veličina, a u Tab. 3.3 dat opseg vrednosti najvažnijih veličina za glavne izolacione materijale.

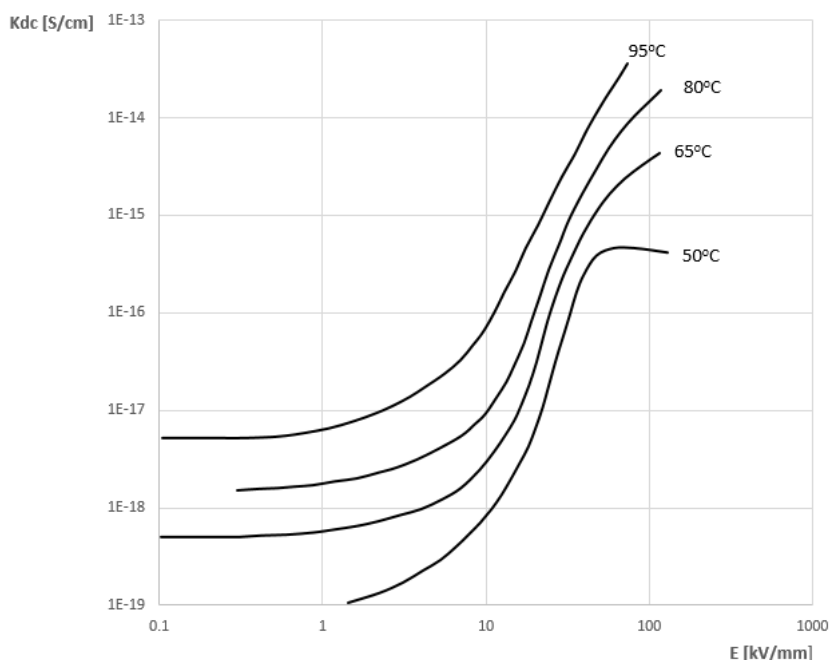
Tab. 3.2 Kategorizacija električnih izolacionih materijala preko vrednosti nekoliko najvažnijih veličina [9] [10]

Električne veličine	Slabi izolatori	Dobri izolatori	Odlični izolatori	Primeri ekstremnih vrednosti
ρ (Ωm)	$10^6 \div 10^{10}$	$10^{10} \div 10^{14}$	$> 10^{14}$	10^{18} (teflon)
$\text{tg } \delta (\times 10^{-4})$	> 100	< 100	< 10	≤ 1 (polietilen, ulja) $< 10^{-4}$ (gasovi)
ϵ_r	> 10	< 10	< 3	15000 (monokristalni BaTiO ₃)
E_{kr} (kV/mm)	< 25	$25 \div 50$	≥ 50	160 (poliesterska folija) 800 (Al ₂ O ₃ film)

Tab. 3.3 Opseg vrednosti najvažnijih veličina za glavne izolacione materijale [10]

Materijal	ρ (Ωm)	DČ, E_{kr} (kV/mm)	ϵ_r (na 50Hz)	$\text{tg } \delta \times 10^{-4}$ (na 50Hz)	Primena
Polietilen	10^{15}	45-60	2.25	< 2	Izolacija kablova (do 70°C ili do 90°C)
PVC	10^{12}	25-50	6.21	730	Izolacija kablova (do 65°C)
Silikonska guma	$10^{12} - 10^{15}$	20-70	2.50-3.50	5-70	Izolacija kablova (do 250°C)
Poliuretan	$10^{15} - 10^{16}$	25	4-10	200-1200	Izolacija kablova (extremni usl.)
Vazduh	10^{18}	3	1	1	VN razmak
SF ₆ (elgas)	10^{18}	9	1	1	VN razmak

Materijali od PE odnosno od XLPE poseduju odlična električna svojstva koja su superiornija u odnosu na mnoge druge dielektrike. Zahvaljujući nepolarnim molekulima dati materijali imaju veoma nisku relativnu dielektričnu permitivnost ϵ_r i veoma male dielektrične gubitke odnosno nizak $\text{tg } \delta$. Pri tome obe veličine pokazuju relativno slabu zavisnost od radne temperature i frekvencije. Takođe, specifična otpornost izolacije ρ je visoka ali ima značajnu zavisnost od radne temperature i primenjenog intenziteta električnog polja. Inverzna vrednost veličine specifične otpornosti izolacije je specifična provodnost σ_{DC} . Njena zavisnost od intenziteta električnog polja sa temperaturom kao parametrom je prikazana na Sl. 3.4.



Sl. 3.4 Specifična jednosmerna provodnost za XLPE (σ_{DC}) u funkciji porasta električnog polja pri različitim temperaturama [33]

Polivinilhlorid (PVC) je polarnog karaktera i zato ima znatno slabija izolaciona svojstva od polietilena, ali je zato znatno jeftiniji, zbog čega se masovno primenjuje za izolaciju provodnika (radnog napona < 1 kV) i sredjenaponskih energetskih kablova (do 30 kV). Pri višim naponima se ne primenjuje zbog velikih dielektričnih gubitaka ($tg\delta$). Radna temperatura mu je do 65°C, kada počinje da omekšava. Nezapaljiv je, ali je manje otporan na struje kratkog spoja (podnosi 160°C u toku 30 s). Ima dobra mehanička svojstva i hemijski je otporan na kiseline, baze, transformatorsko ulje i ozon. Neke od osobina PVC i drugih materijala date su na Sl. 2.3 i Sl. 2.4.

Silikonska guma ima dobra plastična svojstva organskih materijala i temperaturnu postojanost SiO_2 . Dobija se vulkanizacijom silikonskih smola. Vulkanizacija je hemijski izazvano umrežavanje polimernih materijala koji se ubrajaju u gume. Ima odlična mehanička i izolaciona svojstva i hemijski je otporna na rastvarače, vodu, ozon, svetlo i oksidaciju. Koristi se za izolaciju provodnika i kablova u avio industriji, kao i u tehnici visokog napona, prvenstveno zbog nerastvorljivosti u benzinu i ulju, kao i zbog visoke radne temperature (do 250°C). [10]

Poliuretan (PU), za razliku od prethodno spomenutih polimera, ne dobija se polimerizacijom - već poliadicijom, procesom pri kojem se u polimer spajaju molekuli različite vrste, dok se pri polimerizaciji spajaju molekuli iste vrste. Iako ima velike dielektrične gubitke, ima odlična mehanička svojstva (žilavost i čvrstoću, otpornost na habanje i postojanost na vlagu), zbog čega se koristi za izradu izolacije provodnika i kablova u vojne svrhe (u oklopnim vozilima). Koristi se i za izradu livenih delova za prekidače, u radio i telefonskoj tehnici, za izradu lakova za lakiranje žica, itd.

Suv vazduh je vrlo dobar izolator, što se koristi kod VN golih provodnika dalekovoda i razvodnih postrojenja. Međutim vlažan vazduh ima manju specifičnu električnu otpornost i može pri vrlo visokoj vlažnosti da postane provodan. Vlažan vazduh može, uz stvaranje azotne kiseline, hemijski štetno da deluje i na druge dielektrike.

Elgas (sumpor heksafluorid, SF₆) ima nekoliko puta veću dielektričnu čvrstoću od vazduha, zbog velikog hemijskog afiniteta, odnosno sposobnost zahvatanja slobodnih elektrona. Time se stvaraju se slabo pokretljivi negativini, čime se smanjuje efikasnost sudarne jonizacije i povećava dielektrična čvrstoća ovog gasa. Elgas se koristi u izolaciji visokonaponskih kablova, transformatora, kondenzatora i drugih visokonaponskih postrojenja.

Porcelan se široko koristi za izolatore i prolazne izolatore u elektroenergetskom sistemu pre svega zbog velike postojanosti i mehaničkih osobina. Porcelan koji ima primenu u visokofrekventnim objektima sadrži jedinjenja barijuma (BaOAl₂O₃·2SiO₂). [28] Specifična otpornost keramičke izolacije je relativno niska dok je tangens ugla gubitka relativno visok pri čemu značajno rastu sa temperaturom, Sl. 2.3 i Sl. 2.4. Mehaničke osobine porcelana (tvrdoća, žilavost i druge) u poređenju sa drugim čvrstim izolacionim materijalima su manje povoljne, ali su postojane u širokom temperaturnom opsegu. Velika gustina keramike čini porcelanske predmete veoma teškim. Zbog svojih zahteva u elektrotehnici, dimenzije i težina porcelanikih proizvoda otežavaju rukovanje koje često zahteva upotrebu dizalice kao i skupe i velike konstruktivne oslonce. Lomljivost i niska otpornost porcelana na udare otežava rukovanje, transport i ugradnju delova.

Zbog svoje hidrofilne površine porcelan nije pogodan za eksploataciju u uslovima visoke kontaminacije česticama i vlažne sredine. Vлага rastvara deo čestica kontaminacije površine i gradi provodne elektrolite čime se smanjuje ukupni površinski otpor. Takva situacija se posebno razvija u vlažnim uslovima (magla, rosa ili slaba kiša) kada se voda lako taloži i zadržava na zagađenoj površini izolatora. To dovodi do površinskog pražnjenja i početka formiranja puznih staza na mnogo nižim naponima od projektovanih. Time se potiru sve dobre osobine porcelana kao što su hemijska stabilnost porcelana, rezistentnost na starenje i druge, jer dolazi do stvaranja novog postojanog površinskog sloja od vlage i kontaminacije koji ima niske napone preskoka i formiranja puznih staza. [10] [28]

4. ELEKTRIČNA PRAŽNJEŃJA KOD IZOLACIONIH SISTEMA

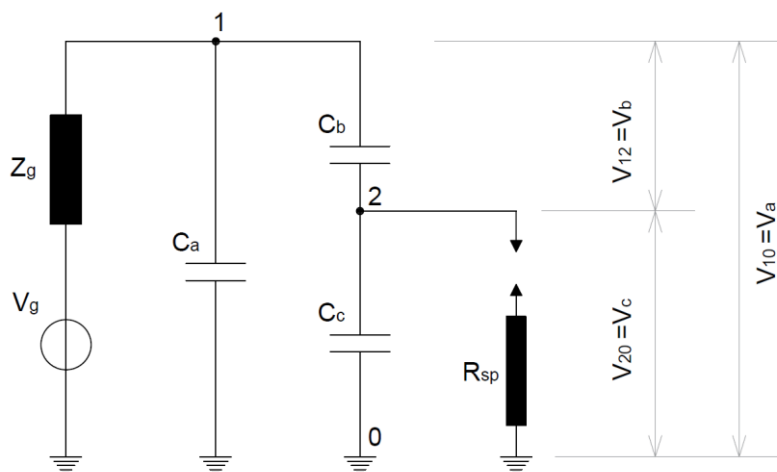
Elektroizolacioni sistemi su opterećeni pojavama parcijalnih pražnjenja i proboja. Dominantnu ulogu kod ovih pojava imaju defekti, ugrađeni ili stvoreni tokom eksploatacije, kao posledica nesavršenosti materijala i tehnologija. Tako izolacioni sistemi imaju slabija mesta, kao što su šupljine ispunjene nekim gasom, razni uključci provodnog ili dielektričnog materijala, nesavršene površine dielektrika ili ograničene međuelektrodne razmake. Dodatna slaba mesta se javljaju tokom eksploatacione degradacije sistema. Pražnjenja kod izolacionog sistema dovode do destrukcije izolacije što smanjuje njen životni vek.

4.1. Osnovni pojmovi parcijalnih pražnjenja

Parametri parcijalna pražnjenja su važna karakteristika izolacionog sistema. Prema definiciji, parcijalna pražnjenja su električna pražnjenja koja se dešavaju samo u delu volumena ili površine dielektrika između dva provodnika na različitim potencijalima. [40] Ako pražnjenja premoste prostor između datih provodnika dolazi do električnog proboja izolacionog sistema.

Parcijalna pražnjenja mogu dovesti do lokalnog oštećenja izolacionog materijala usled elektrohemijske erozije. Tom prilikom mogu da nastanu korozivni gasovi koji mogu prouzrokovati dalja oštećenja u širem delu izolacionog sistema.

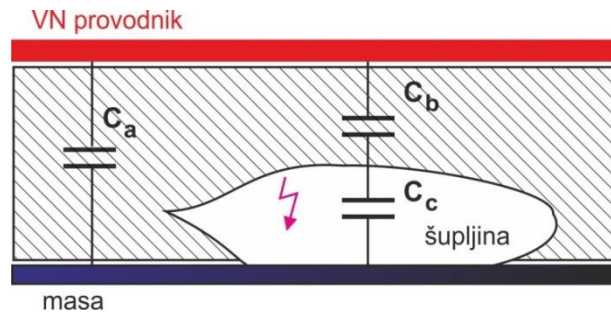
Postoji više modela parcijalnih pražnjenja u literaturi. Među najstarijim modelima je prikazan na Sl. 4.1 i poznat je pod imenom *abc model* [41] gde se označavaju pojedini karakteristični delovi izolacionog sistema odnosno pripadajući kapaciteti. Ekvivalentni električni model delova izolacionog sistema i defekta u kojem se javljaju parcijalna pražnjenja prikazan je na Sl. 4.2.



Sl. 4.1 Električni model izolacije sa parcijalnim pražnjenjem [41]

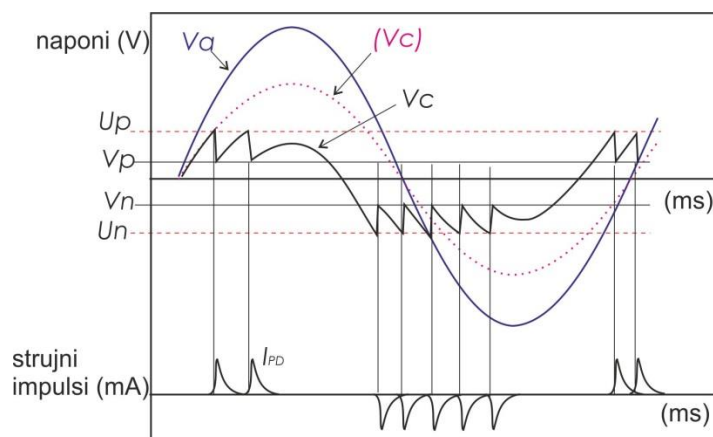
Na Sl. 4.1 i Sl. 4.2 dati defekat u izolaciji se modeluje vazdušnom šupljinom koja ima kapacitet C_c . Deo izolacionog sistema koji ima značaja za parcijalna pražnjenja u datoj šupljini je modelovan sa kapacitetom C_a a deo izolacije koji je na red sa defektom sa C_b .

Proboj vazdušne šupljine modelovan je odvodnikom prenapona (R_{sp}) paralelno vezanim kapacitetu šupljine C_c .



Sl. 4.2 Defekt u izolaciji, gasni mehur, i ekvivalentni električni model; S1, S2 aktivne površine šupljine (karbonizirana ili metalizovana površina) [41]

Proces parcijalnih pražnjenja, prema datom modelu, se opisuje preko proboja vazdušne šupljine pod definisanim uslovima koji dovodi do preraspodele naelektrisanja na datim kapacitetima. Prema Sl. 4.1 kada se izolacioni sistem opterećuje naizmeničnim naponom $V_{10} = V_a$ na kapacitetu C_a dolazi do punjenja datih kapaciteta izolacionog sistema C_b i C_c na napone $V_{12} = V_b$ i $V_{20} = V_c$ respektivno. U trenutku kada napon na šupljini dostigne kritičnu vrednost probojnog napona $U_p = V_c$, dolazi do proboja šupljine i do brzog pada napona na njoj za vreme manje od 100 ns kao što je prikazano na Sl. 4.3. Napon na šupljini V_c opada do vrednosti napona gašenja varnice V_p . Istovremeno dolazi do brzog skoka napona V_b na kondenzatoru C_b . U spoljašnjem kolu se javlja strujni impuls pražnjenja, kojim se dopunjuje kondenzator C_b . Zbog daljeg porasta spoljašnjeg napona V_a dolazi do stvaranja uslova ponovnog punjenja (dopunjavanja) kondenzatora C_c do napona U_p i novog pražnjenja. Pri tome treba imati u vidu da su pražnjenja stohastička pojava i da su svi karakteristični naponi i struje stohastičke veličine čija su odstupanja simbolično naznačena na Sl. 4.3. [41]



Sl. 4.3 Dijagrami napona i struja kod parcijalnih pražnjenja: $V_{10} = V_a$ - napon na objektu, $[V_c]$ -napon šupljine kada nema pražnjenja, $V_{20} = V_c$ -napon šupljine kada postoji pražnjenje, I_{pd} - strujni impulsi pražnjenja. ΔU_p , ΔV_p - stohastička odstupanja veličina U_p i V_p respektivno [41]

Brojni su nedostaci ovog modela parcijalnih pražnjenja ali se on i dalje koristi kada je potrebno na jednostavan i intuitivno razumljiv način uvesti osnovne elemente parcijalnih pražnjenja. Jedan od nedostataka je taj što model ne može da objasni pojavu impulsa parcijalnih pražnjenja u zoni u kojoj spoljašnji napon V_a prolazi kroz nulu, što je praktično najčešći slučaj kod dobrih izolacionih sistema. Naime, tada napon odnosno kritično električno polje na kapacitetu C_c ne bi trebalo da postoje. Razvijeniji modeli dopunjuju dati model memorijskim efektom sistema, to jest zadržavanjem naelektrisanja od prethodnog proboja. [41] Treba naglasiti da zaostalo naelektrisanje nije jedini memorijski efekat jer postoje i drugi procesi koji prate parcijalna pražnjenja a čiji efekti mogu biti kumulativni, odnosno da preko tog pamćenja određuju uslove za novi impuls parcijalnih pražnjenja.

Potrebno je istaći izrazitu stohastičnost pojava parcijalnih pražnjenja. Samo predprobojni procesi su izrazito stohastični što dovodi do stohastičnosti pojave inicijalnog elektrona u šupljini. Sa druge strane procesi u kanalu varnice su stohastični i nelinearni što dovodi do fluktuacije otpornosti kanala varnice $R_s(i,t)$ odnosno do fluktuacije vremena trajanja strujnog impulsa parcijalnih pražnjenja. Dodatno ukupnoj stohastičnosti doprinose stohastičnosti napona paljenja i napona gašenja.

4.1.1. Osnovne veličine parcijalnih pražnjenja

Osnovne veličine parcijalnih pražnjenja su definisane u IEC standardu: [17] naelektrisanje i prividno naelektrisanje parcijalnih pražnjenja, napon pojave i napon gašenja parcijalnih pražnjenja, učestalost ponavljanja, prosečna struja i normalizovan broj pražnjenja, fazni ugao i fazna raspodela naelektrisanja parcijalnih pražnjenja i drugi.

Naelektrisanje parcijalnih pražnjenja q_{pp} je naelektrisanje koje protekne kroz kanal varnice tokom trajanja impulsa parcijalnih pražnjenja. Ovo pražnjenje je nedostupno za merenje. Ono što je dostupno je merenje impulsa, naponskog ili strujnog, koji je prisutan na mernom pristupu, a nastao je kao odziv na impulsnu pobudu stvarnog impulsa parcijalnih pražnjenja. Odziv zavisi od udaljenosti izvora parcijalnih pražnjenja od mernog pristupa odnosno od prenosne funkcije tog dela posmatranog visokonaponskog dela objekta.

Prividno naelektrisanje parcijalnih pražnjenja q_p je ono naelektrisanje koje se može detektovati na mernom pristupu. Ono se određuje uporednom metodom, injektovanjem poznate količine naelektrisanja na visokonaponskim pristupima ispitivanog objekta i merenjem odziva na mernom pristupu. Poređenjem odziva od poznatog naelektrisanja i odziva od realnog prividnog naelektrisanja procenjuje se vrednost prividnog naelektrisanja. Vrednost se izražava u pC.

Napon pojave parcijalnih pražnjenja PDIV (Partial Discharge Inception Voltages) je najniži napon pri kojem je magnituda pražnjenja prelazi određenu vrednost, pri čemu se primenjeni napon postepeno povećava od vrednosti kada nema parcijalnih pražnjenja.

Napon gašenja parcijalnih pražnjenja PDEV (Partial Discharge Extinction Voltages) je napon pri kojem magnituda pražnjenja postaje manja od određene vrednosti, pri čemu se primenjeni napon postepeno smanjuje do date vrednosti.

Učestalost ponavljanja N (pulse repetition rate) impulsa parcijalnih pražnjenja je prosečan broj proizvedenih strujnih impulsa u sekundi. Ponavljanja se mogu pratiti za pojedine klase parcijalnih pražnjenja, na primer samo za negativne impulse, samo za impulse određene magnitude itd.

Prosečna struja pražnjenja I (average discharge current) je definisana kao suma apsolutnih količina naelektrisanja parcijalnih pražnjenja $|q_i|$ koje prolaze kroz krajeve ispitnog objekta tokom vremenskog intervala posmatranja T_{ref} :

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + |q_3| + \dots + |q_n|)$$

Izražava se u μA i odražava ukupnu aktivnost parcijalnih pražnjenja.

Normalizovan broj pražnjenja NQN (normalized quantity number), prema standardu IEEE1434_2000, normalizuje statističku raspodelu pražnjenja odnosno broj impulsa u sekundi prema formuli:

$$NQS = \frac{FS}{G \times N} \times \left[\frac{\log P_1}{2} + \sum_{i=2}^{N-1} \log P_i + \frac{\log P_N}{2} \right]$$

gde su: P_i - broj impulsa u sekundi u određenom opsegu (razredu) magnituda, N - broj razreda (opsega, prozora), G - linearno pojačanje sistema, FS - maksimalna izmerena magnituda. Logaritamskom skalom broja pražnjenja povećava se osetljivost na promene za niski broj ponavljanja i „prigušuje“ se osetljivost na promene učestalijih pražnjenja.

Fazni ugao ϕ_i (phase angle) je povezan sa trenutkom t_i događaja impulsa parcijalnih pražnjenja merenog od trenutka nulte faze primenjenog sinusnog napona. Fazna raspodela prividnog naelektrisanja $q_p(\phi_i)$ je vrlo važna dijagnostička veličina.

Fazna raspodela naelektrisanja parcijalnih pražnjenja (Phase-Resolved Partial Discharge Pattern, PRPDP) je jedan od najvažnijih načina prikazivanja raspodele parcijalnih pražnjenja i predstavlja faznu raspodelu prividnog naelektrisanja $q_p(\phi_i)$.

4.1.2. Osnovni tipovi parcijalnih pražnjenja

Postoji više podela parcijalnih pražnjenja u zavisnosti od statističkih ili dijagnostičkih kriterijuma: [41] [17] [42]

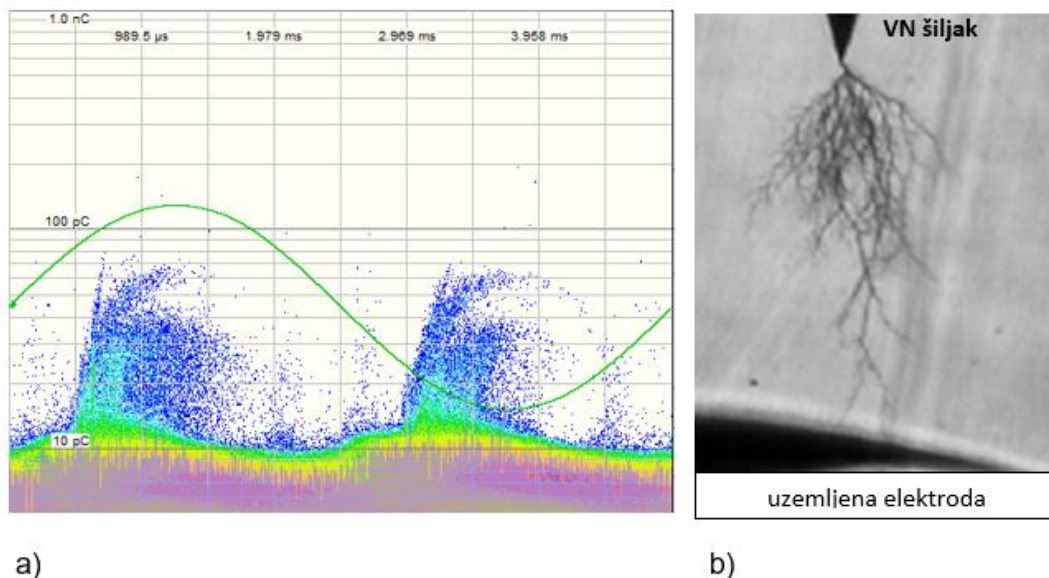
Tip A – parcijalna pražnjenja unutar čvrstih izolacionih sistema

Ovaj tip parcijalnih pražnjenja se odnosi na čvrste izolacione sisteme gde se pražnjenje javlja u volumenu homogenog dielektrika ili na unutrašnjim razdvojnima površinama i površinama prema elektrodama. Na Sl. 4.4 dati su različiti primeri unutrašnjih parcijalnih pražnjenja tipa A.

A1 - Parcijalna pražnjenja u volumenu čvrstih dielektrika bez defekata. Nastaju kada jako lokalno električno polje Zenerovim efektom ili lavinskim efektom generiše slobodne elektrone u materijalu koji dalje pokreću lavine koje stvaraju provodne kanale u izolaciji. Kanali u čvrstoj izolaciji imaju trajan karakter, što može da uslovi pojavu delimičnog oštećenja dielektrika (takozvani ukalupljeni kanali).

A2 - Unutrašnja parcijalna pražnjenja u defektima, šupljinama. Šupljine karakteriše ispunjenost vazduhom ili nekim drugim gasovima. Sa stanovišta parcijalnih pražnjenja bitan je njihov oblik, način pružanja duž električnog polja i eventualno postojanje metalnih površina. Parcijalna pražnjenja u izolovanim šupljinama dielektrika (izolacije) koje nastaju usled osobenosti dielektrika, kao posledica tehnoloških procesa formiranja izolacije ili kao posledica eksploatacije i starenja izolacije. Takođe, parcijalna pražnjenja mogu da budu u šupljinama raslojavanja izolacionog materijala kod izolacija koje se prave od slojeva dielektrika sa određenim vezivnim materijalom.

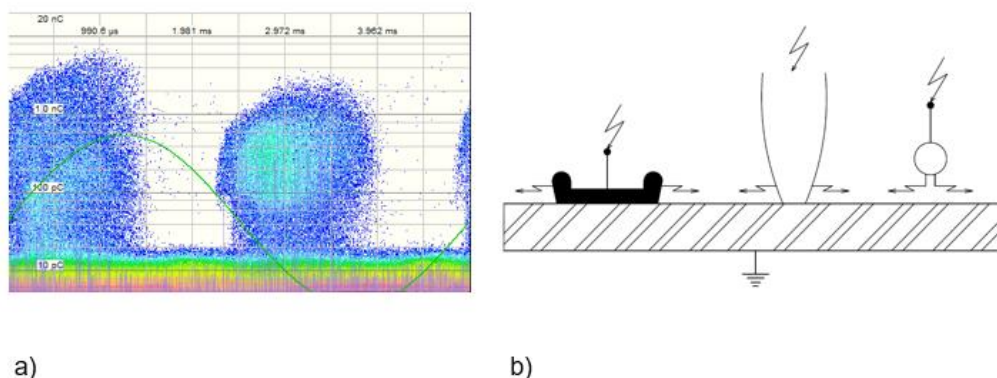
A3 - Parcijalna pražnjenja između izolacije i elektrode. Tokom izrade ili eksploatacije elektrodnog sistema dolazi do odvajanja izolacije i visokonaponskog provodnika ili odvajanja izolacije od uzemljenih provodnika. Između izolacije i provodnika se najčešće stavlja nisko provodni sloj da eliminiše ili smanji parcijalna pražnjenja. Prilikom odvajanja izolacije od njega dolazi do oštećenja nisko provodnog sloja najčešće zbog cikličkih termičkih naprezanja tokom eksploatacije (razlikiti koeficijenti termičke dilatacije dielektrika i metala). Oštećenja mogu da nastanu i hemijskom agresijom, abrazijom ili erozijom materijala, gubitkom pritiska itd.



Sl. 4.4 Primeri tipa A unutrašnjih parcijalnih pražnjenja [43] [44]

Tip B - Površinska parcijalna pražnjenja (Sl. 4.5). Javljaju se na dodirnim površinama različitih elektroizolacionih materijala, odnosno materijala sa različitim relativnim dielektričnim konstantama što je preduslov stvaranja jakog tangencijalnog električnog polja koje dovodi do stvaranja provodnih staza. Jaka tangencijalna polja mogu da budu i posledica elektrodne konfiguracije (konstrukcionih rešenja) kao na primer u situaciji

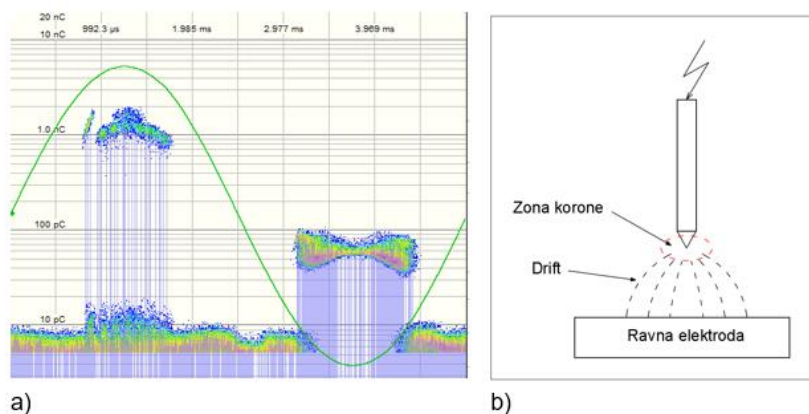
kada provodnik izlazi iz profilisanog kvazihomogenog polja (kablovske završnice, glave generatorskih štapova i dr.). Za površinska pražnjenja od bitnog je značaja stanje posmatranih površina i razlika dielektrične konstante na razdvojnoj površini dva dielektrika. Prisustvo vlage na razdvojnoj površini vazduh - čvrsti dielektrik značajno pojačava tangencijalnu komponentu polja i stvara provodne staze rastvaranjem nečistoća. Takođe, tangencijalno polje značajno pojačava prisustvo provodnih ili neprovodnih čestica zbog preraspodele polja i efekata šiljaka.



Sl. 4.5 Primeri tipa B površinskih parcijalnih pražnjenja [43] [44]

Tip BL - Parcijalna pražnjenja u laminiranim materijalima. Ova pražnjenja su relativno slična površinskim parcijalnim pražnjenjima ali se izdvajaju time što nisu posledica mehaničke nesavršenosti dielektrika već značajne razlike relativne dielektrične konstante slojeva. Parcijalna pražnjenja se u ovom slučaju pojavljuju na graničnoj, odnosno dodirnoj površini različitih slojeva. U zavisnosti od konfiguracije izolacionog sistema odnosno linija električnog polja, mogu se pojaviti jaka tangencijalna ili normalna električna polja koja mogu premašiti kritično polje za iniciranje pražnjenja.

Tip C - Parcijalna pražnjenja tipa korone. Koronarna pražnjenja se pojavljuju na oštrim ivicama elektroda ili na tankim provodnicima koji su uzemljeni ili povezani na visoki napon, Sl. 4.6.



Sl. 4.6 Primer tipa C parcijalnih pražnjenja – korona [43] [44]

Pri tome dolazi do lokalnog pojačanja električnog polja sa velikim gradijentom opadanja sa udaljavanjem od navedenih površina. Ova pražnjenja su karakteristična za gasne (na primer vazdušne) izolacije, ali i za tečne izolacije u elektroenergetskim postrojenjima.

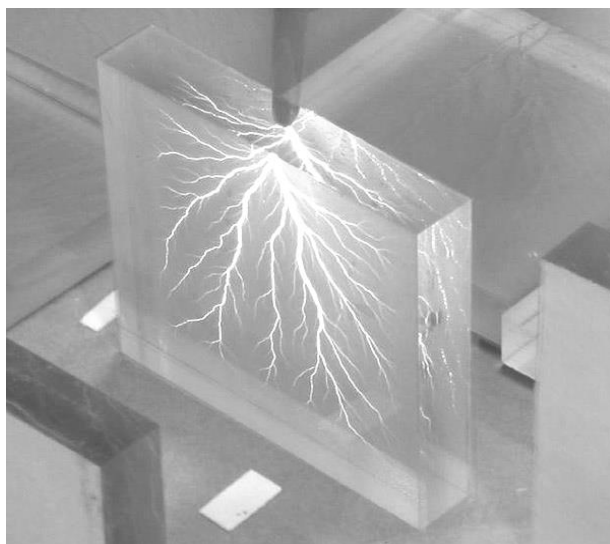
4.2. Električni proboj kod čvrstih dielektrika

Procesi odgovorni za proboj čvrstih dielektrika se znatno razlikuju od procesa proboja gasovitih i tečnih dielektrika. Sami mehanizmi proboja su manje shvaćeni u odnosu na fluide. U prvom redu razliku čini „neobnovljivost oštećenja“ kod čvrste izolacije, odnosno kumulativni efekti procesa proboja. Na probojni napon čvrstih materijala utiču mnogi faktori kao što su karakteristike električnog opterećenja (lokalno električno polje, frekvencija, amplituda, impulsi), temperatura okoline i izolacionog sistema, vlažnost okoline i same izolacije, trajanje opterećenja (eksploatacija, ispitivanje), unutrašnje i spoljašnje nečistoće, strukturni defekti, mehaničko opterećenje. [35]

Zbog navedenog, kod proboja čvrstih dielektrika jako je izražena vremenska zavisnost i sinergija naponskog, termalnog, erozivnog i drugih opterećenja.

4.2.1. Unutrašnji elektronski proboj volumena dielektrika

Teško je izolovati procese proboja koji se odnose samo na čist i homogen dielektrični materijal na način da ostali faktori ne utiču (temperatura i uslovi okoline idr.). To se donekle postiže u kontrolisanim uslovima uz veoma brza naponska opterećenja, reda 10 ns , tako da se izbegnu sve promene materijala zbog drugih faktora. Na Sl. 4.7 dat je primer unutrašnjeg elektronskog proboja.



Sl. 4.7 Elektronska pražnjenja u homogenim čvrstim dielektricima [45]

Tako se postiže da unutrašnja čvrstoća uglavnom zavisi od strukture materijala. Potrebni naponi odnosno električno polje koje dovodi do probaja je reda $10^6 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ što je jako visoka vrednost. To se objašnjava time da su, u čistim i homogenim materijalima, valentna i

provodna elektronska zona razdvojene velikim energetske procepom, i da nema elektrona u provodnoj zoni. Za njihovo prebacivanje iz valentne u provodnu zonu potrebna su vrlo jaka električna polja. Do proboja dolazi kada gustina elektrona u provodnoj zoni postane tolika da se formira provodni kanal. Treba naglasiti da nijedan izolacioni materijal nije čist od primesa i strukturnih grešaka koje značajno mogu da olakšaju pojavu provodnih elektrona i time smanje dielektričnu čvrstoću materijala.

4.2.2. Elektromehanički proboj

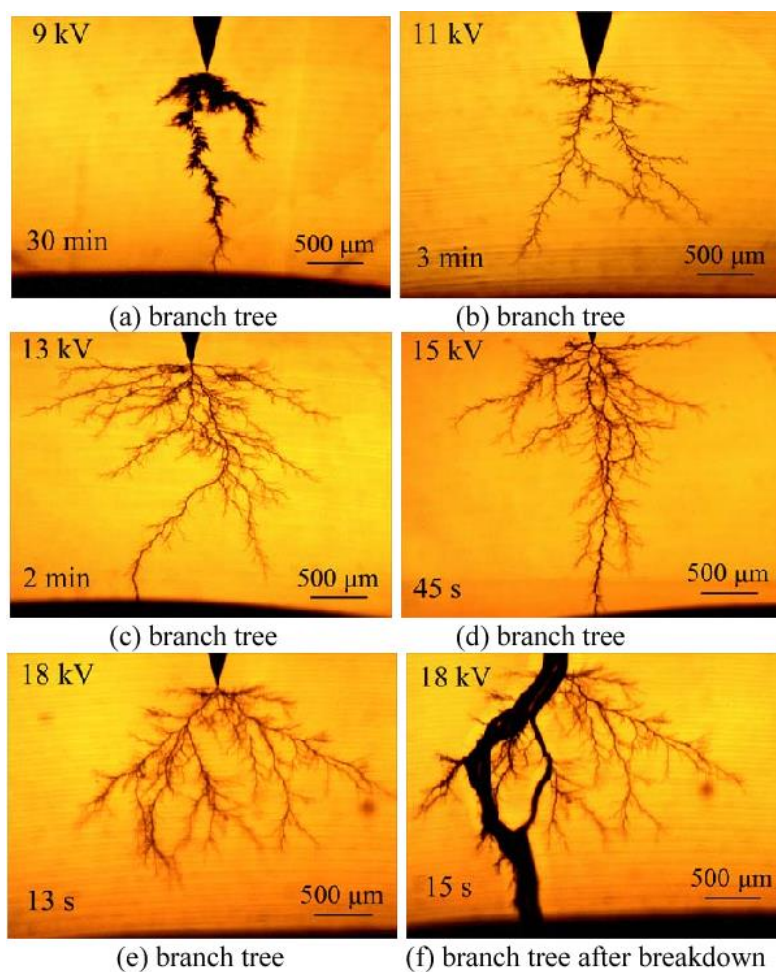
Kada se dielektrik brzo podvrgne jakom električnom polju kao u slučaju elektronskog proboja, elektrostatičke sile mogu da razdvoje pozitivna i negativna naelektrisanja (jone i elektrone) u dve razdvojene ravni materijala. Pod određenim uslovima može da se pojavi elektrostatička sila između tih ravni koja sabija dielektrični materijal. U ovom slučaju sila pritiska na dielektrik može da potiče i od elektroda VN sistema. Kada nastala sila stvori mehanički napon σ u materijalu koji prevazilazi mehaničku otpornost materijala γ , može doći do mikropucanja sloja. Pojava je vrlo složena i zavisi od vrste materijala, načina izrade, orijentacije osa kristala i linija polja, defekata koji mogu da izazovu koncentraciju napona mehaničkog naprezanja i drugi efekti. Aproksimativno se mogu uspostaviti jednačine koje daju približnu jačinu kritičnog lokalnog električnog polja E_l koje može dovesti do loma (mikropukotina): [35] [46]

$$E_l \sim \sqrt{\frac{\gamma}{\epsilon_0 \epsilon_r}}$$

gde je $\epsilon_0 \epsilon_r$ dielektrična konstanta posmatranog dielektrika.

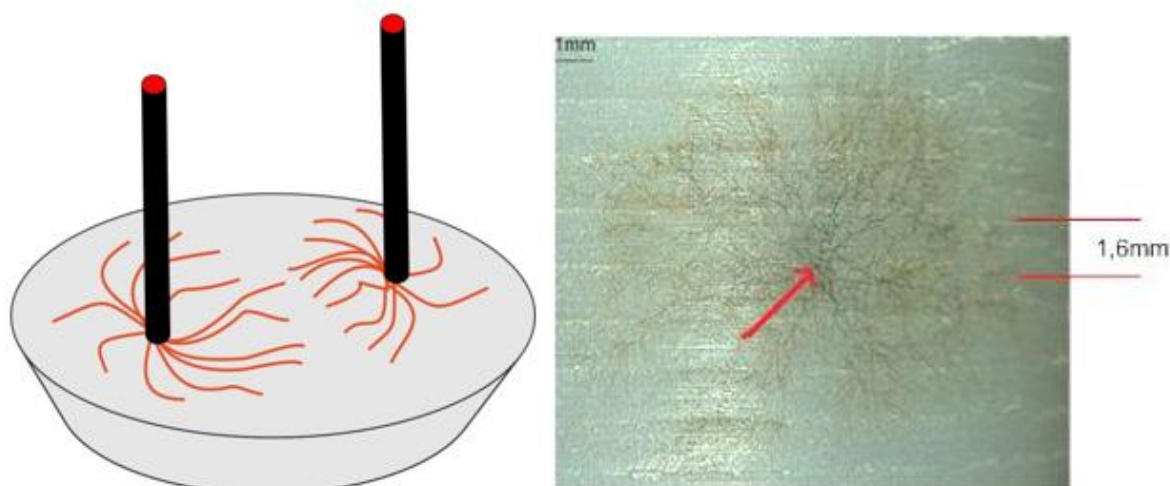
4.2.3. Žbunasti proboj i proboj puznom stazom

Žbunasti proboj [46] može nastati kod svih čvrstih izolacionih sistema koji imaju nehomogeni dielektrik, a najčešće se javlja kod kablova sa plastičnom izolacijom. Pretpostavlja se da do proboja posmatranog dielektrika dolazi zbog stvaranja inicijalnog elektrona Zenerovim ili sudarnim efektom, koji dalje inicira lavinske procese slične kao kod gasova. Lavine prave određene erozivne kanale koji su najčešće karbonizovani i od kojih se dalje granaju nove lavine i novi kanali. Kada se primeni jako električno polje na dielektrik, odnosno visoki napon na izolacioni sistem, dolaze do izražaja različiti fenomeni i procesi koji mogu dovesti do električnog proboja sistema. Tako kod izolacionih sistema sa čvrstim materijalima dolaze do izražaja razne nesavršenosti strukture i nehomogenosti materijala. Kada čvrsti materijali imaju gasne, tečne ili čvrste dielektrične uključke probojni napon strukture će biti određen dominantno njima. Uključci redovno imaju znatno različitu relativnu dielektričnu konstantu i nepravilne oblike sa ivicama. To dovodi do značajnog diskontinuiteta električnog polja, do njegovog pojačanja na ivicama i do lokalnog proboja (parcijalna pražnjenja). Lokalno polje može da bude reda $10^7 \frac{V}{cm}$ što je značajno izvan granice mehaničkog mikroloma. Delovanjem lokalnih polja i pražnjenja može doći do razvoja proboja u vidu žbuna, Sl. 4.8.



Sl. 4.8 Razvoj žbunastog proboja u zavisnosti od uslova [47]

Proboj puznom stazom se događa na razdvojnoj površini dva dielektrika, najčešće čvrstog izolatora i vazduha. Nečistoće kao što su vlaga i provodne i neprovodne čestice će se taložiti na površini čvrstog izolatora. Pod uticajem vlage i jakog električnog polja na nečistoće dolazi do stvaranja jona na površini materijala koji se počinju kretati pod uticajem tangencijalne komponente polja. Te mikrostruje stohastičkog karaktera (parcijalna pražnjenja) se kapacitivno zatvaraju u električno kolo i neprestano deluju na površinu. Vremenom se razvijaju procesi mikroproboja po površini koji karbonizuju staze curenja struje kroz koje teku jače struje curenja i jači efekti zagrevanja, karbonizacije i efekata šiljaka. Proces se nastavlja do konačnog provodnog premošćenja površine između dve elektrode visokog napona odnosno do proboja izolacionog sistema. Proces karbonizacije se odvijaju u organskim materijalima kontaminacije ili čvrsta površina ima organski materijal. Povećanje površinskog probojnog napona izolacionog sistema se može realizovati upotrebom pogodnih materijala čija površina inhibira karbonizaciju i dizajnom elektrodnog sistema koji rešava probleme kritičnog električnog polja karbonizacije. Na Sl. 4.9 data je ilustracija površinskih električnih pražnjenja.



Sl. 4.9 Ilustracija površinskih električnih pražnjenja [45]

4.2.4. Elektrotermički proboj

Kada je izolacioni materijal podvrgnut električnom polju, materijal se zagreva usled struje curenja i dielektričnih gubitaka usled polarizacije. [35] [46] Provodnost materijala se povećava sa povećanjem njegove temperature a ovo dovodi do povećanja struja curenja. Ovde može da se pojavi pozitivna povratna sprega, kada generisna toplota premaši toplotu disipacije sistema i temperatura materijala premaši određenu kritičnu temperaturu. Tada izolacioni sistem ulazi u određenu nestabilnost koja pod uticajem električnog polja može da dovede do destrukcije materijala i do elektro termičnog proboja. U Tab. 4.1 date su vrednosti kritičnog električnog polja za termički proboj različitih dielektričnih materijala .

Tab. 4.1 Kritična električna polja za termalni proboj dielektrika [46]

Vrsta materijala	Naziv materijala	Termičko probojno polje (MV/cm)	
		Jednosmerni	Naizmenični
Keramike	Visokonaponska keramika	-	10
	Niskonaponska keramika	-	1.5
	Visokokvalitetni porcelan	-	2.8
Organski materijali	Ebonit		1.45-2.75
	Polietilen		3.5
	Polistiren		5.0
Liskun (mika)	Muskovitni liskun	24	7-18
Kamena so	Kristalna kamena so	38	1.4
Kvarc	Kristal poprečno na polje	12000	-
	Kristal paralelno polju	66	-
	Nečist kristal	-	2.2

4.2.5. Elektrohemijski proboj

Inicijalna pražnjenja počinju u gasnim šupljinama izolacionog sistema. Elektrodisocijacija gasa stvara jone i razne nestabilne molekule i radikale. [46] Pod dejstvom električnog polja, joni i elektroni udaraju u zidove šupljine i vrše elektroeroziju ili dovode do lokalne termalne nestabilnosti. Razni nestabilni molekuli i radikali kao što su O_3 , NO_2 mogu da dovedu do hemijske erozije površina. Neto efekat svih ovih procesa je spora erozija materijala i posledično smanjenje debljine zidova. To dovodi do starenja izolacionog sistema koje se ogleda u smanjenju probojnog napona odnosno do smanjenja kritičnog električnog polja (dielektrične čvrstoće).

5. IZOLACIONI SISTEMI ELEKTROENERGETSKE OPREME

Aktuelni trend u razvoju visokonaponske (VN) tehnike se kreće u pravcu povećanja gustine snage (po jedinici mase i/ili jedinici zapremine) što rezultuje povećanjem nazivnog napona i smanjenjem gabarita VN jedinica. Sa druge strane postoji trend zahteva za produženje životnog veka VN jedinica, kako za novoprodukovane tako i za one u pogonu. Zbog toga se zateva posebna pažnja na podizanju pouzdanosti rada i raspoloživosti tih jedinica. Jedan od ključnih elemenata VN jedinica je izolacioni sistem. Stoga se značajno ulaže u razvoj novih izolacionih materijala i novih tehnologija. Takođe se razvijaju i novi izolacioni sistemi gde se koriste kompjuterski programi za analizu raspodele električnog polja u izolacionim sistemima kako bi se optimizovali. Sa druge strane unapređuju se ispitivanja, dijagnostika i održavanje VN objekata i izolacionih sistema.

Elektroizolacioni sistemi moraju da ispunjavaju nekoliko primarnih funkcija koje se mogu podeliti na tri osnovne funkcije električne izolacije:

- razdvajanje provodnika na visokom naponu, međusobno i prema zemlji,
- izolacione barijere između različitih VN zona,
- izolacija za sprečavanje površinskih puznih staza.

Elektroizolacioni sistemi moraju da ispunjavaju i nekoliko sekundarnih funkcija koje se mogu podeliti na funkcije:

- mehanička potpora visokonaponskih provodnika,
- zaštitna kućišta za visokonaponske sklopove,
- uvodnici ili prolazni izolatori za visokonaponske provodnike,
- odvođenje toplote dizipacije.

Posebnim konstrukcijama i korišćenjem različitih izolacionih medijuma potrebno je osigurati dovoljnu dielektričnu čvrstoću prostora između provodnika na različitim radnim potencijalima. Međutim, izolacioni sistem mora da izdrži i određene prenapone.

Vazduh je izolacioni medijum koji se najčešće koristi ili je neizbežno prisutan kod visokonaponskih postrojenja i vodova. U zavisnosti od uslova (vazdušnog pritiska, sastava, kontaminacije...) menjaće se njegova dielektrična čvrstoća. Tako vazduh postaje sastavni deo svih proračuna i izvođenja izolacionih sistema.

Visokonaponski objekti (mašine, kablovi, izolatori...) u pogonu izloženi su vrlo složenim uticajima kao što su termička i mehanička naprezanja, vibracije, klimatski i ambijentalni uticaji, jako električno i magnetno polje itd. Naravno, istim uticajima izložen je i njihov izolacioni sistem. Tako je moguće da najmanja oštećenja izolacije, koja neznatno narušavaju mehaničke karakteristike, prouzrokuju električni provboj i ispad iz pogona. Kada se provodnik VN objekta nalazi na visokom naponu, u neposrednoj izolaciji i ostatku prostora prema uzemljenim delovima kao i prema drugim provodnicima različitog potencijala, uspostavi se određeno električno polje. Sistem se tako projektuje da se ni u jednoj zoni izolacije i prostora ne pojavi kritično (probojno) električno polje. Međutim, ono se ipak pojavljuje u inicijalnim defektima (nesavršenost proizvodnje) ili tokom

starenja nastalim defektima i oštećenjima izolacionog sistema mašine. Ponekad do oštećenja izolacije može doći i zbog skrivenih, konstrukcionih nedostataka u kombinaciji sa uslovima eksploatacije i niza drugih faktora.

5.1. Izolacioni sistemi visokonaponskih obrtnih mašina

Elektroizolacioni sistem obrtnih mašina je vrlo složen i ispunjava više funkcionalnih zahteva: elektroizolacione, termičke i mehaničke. [12]

Elektroizolaciona funkcija je primarna. Izolacija VN provodnika ili dela VN namotaja je projektovana tako da izdrži sve napone i prenapone koji se mogu pojaviti. Pored električne izolacije, u zavisnosti od konstrukcije mašine i naponskog nivoa, posebno se dodaju obloge od izolacionog materijala postavljene u žljebove ili između navojaka različitih faza koje imaju ulogu mehaničke zaštite i zaštite od različitih erozija.

Mehanička funkcija električne izolacije je višeslojna. Pored konstrukcije (noseće) dimenzije, izolacioni sistem mora da poseduje otpornost prema nizu mehaničkih naprezanja kao što su razne mehaničke i elektromagnetne sile, pritisci, pomeranja, dilatacije, čestične kontaminacije, abrazija i druga naprezanja. Od posebne važnosti je otpornost izolacionog sistema na vibracije zbog prisustva elektromagnetnih sila oscilatornog karaktera frekvencije dvostruko veće od frekvencije struje (100Hz ili 120Hz) i niza harmonika. Izolacioni sistem treba da bude izveden tako da sprečava (amortizuje) vibracije bakarnih provodnika, usled elektromagnetnih sila, u širokom rasponu radnih parametara. Ako je glavna izolacija provodnika plastična na radnim temperaturama tada bakarni provodnici mogu da se pomeraju ili vibriraju. To može da dovede do narušavanja strukture izolacije (slabljenje učvršćenja, slabljenje materijala...), do habanja i abrazije odnosno do pojave slabih mesta generalno. Pri tome je posebno značajno da su sopstvene frekvencije električne mašine udaljene od osnovne frekvencije i harmonika elektromagnetnih sila, u svim uslovima rada. [12] [48]

Termička funkcija izolacionog sistema je najčešće posredna ali jedna od najvažnijih funkcija. Najčešće korišćeni materijali kao elektroizolacioni su i termički izolatori. Zbog toga se pri projektovanju mašine moraju proračunavati izvori toplote i njeno odvođenje iz sistema. Kod indirektno hlađenih mašina prenos toplote od bakarnih provodnika (kao izvora toplote) do statorskog jezgra (kao rashladnih elemenata) ide kroz izolacione slojeve. Zbog toga izolacija treba da ima što nižu toplotnu otpornost, da bi se sprečile previsoke temperature u bakru i izolaciji. Prilikom formiranja namotaja treba izbeći formiranje vazdušnih džepova koji dodatno blokiraju odvođenje toplote. Sa druge strane sama izolacija mora biti u stanju da izdržava visoke temperature koje se neizbežno pojavljuju čak i kao radne temperature, Tab. 5.1

Tab. 5.1 Termička klasifikacija izolacije obrtnih električnih mašina [46]

Oznaka termičke klase	Maksimalna temperatura	Izolacioni materijali
Y	do 90° C	pamuk, papir, PVC
A	do 105° C	folije, impregnirani papir
E	do 120° C	lak
B	do 130° C	liskun+impregnati B klase
F	do 155° C	kao kod V klase + veziva i lakovi F klase
H	do 180° C	Neorganski + silikoni
C	> 180° C	Čisti neorganski

Izolacioni sistem električne mašine i kabla čine raznovrsni izolacioni materijali sa svojim osobinama i termičkom klasom. Kako se svi delovi nekog električnog uređaja ne zagrevaju jednako, tako ni svi izolacioni materijali nisu jednako termički opterećeni. Stoga u nekom izolacionom sistemu u kome je ugrađen izolacioni materijal recimo termičke klase F (155°C) mogu biti ugrađeni i materijali niže termičke klase, a da funkcionalnost izolacionog sistema nije narušena. Pri izboru materijala za određeni izolacioni sistem mora se voditi računa o temperaturnoj usklađenosti kao i međusobnoj kompatibilnosti različitih materijala koji dolaze u neposredni kontakt (guma, mineralno ulje, metal ...).

5.1.1. Konstrukcija statorskog namotaja obrtnih mašina

Koriste se tri osnovna tipa strukture namotaja statora u opsegu snaga od 1 kW do više od 1000 MW: [12]

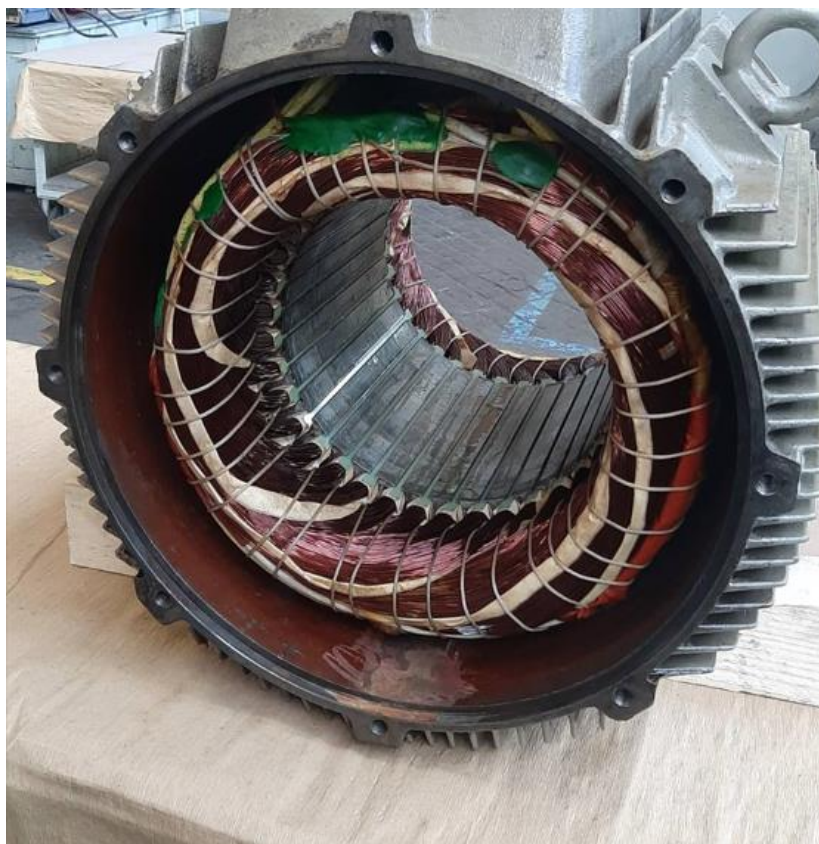
- slobodno namotani statorski namotaji,
- namotaji sa formiranim statorskim namotajima (kanurama),
- namotaji sa formiranim statorskim polunavojima (štapovima - Rebelovani štapovi).

Generalno, statori sa slobodno namotanim namotajima se obično koriste za mašine do nekoliko stotina kW. Namotaji sa kanurama se koriste kod velikih motora i kod generatora od 50 MVA do 100 MVA. Rebelovani štapni namotaji se koriste za velike (krupne) generatore i motore.

5.1.1.1. Statori sa slobodnim namotavanjem

Statori sa slobodnim namotavanjem se sastoje od okruglih, izolovanih bakarnih provodnika (žice) koja se namotava neprekidno (ručno ili mašinom za namotavanje) kroz proreze u jezgru statora da bi se formirao namotaj (Sl. 5.1). Svaki navoj (petlja) žice bi se u principu mogao nasumično postaviti preko bilo kojeg drugog navoja žice u namotaju, nezavisno od nivoa njegovog napona. Pošto navoj koji je povezan sa faznim izvodom može biti susedan sa navojem niskog napona (na primer pri neutralnoj tački), slobodno

namotani statori se obično izrađuju za napone do 1000 V. Ovo ograničava snagu mašine do nekoliko stotina kW. [12] [48]

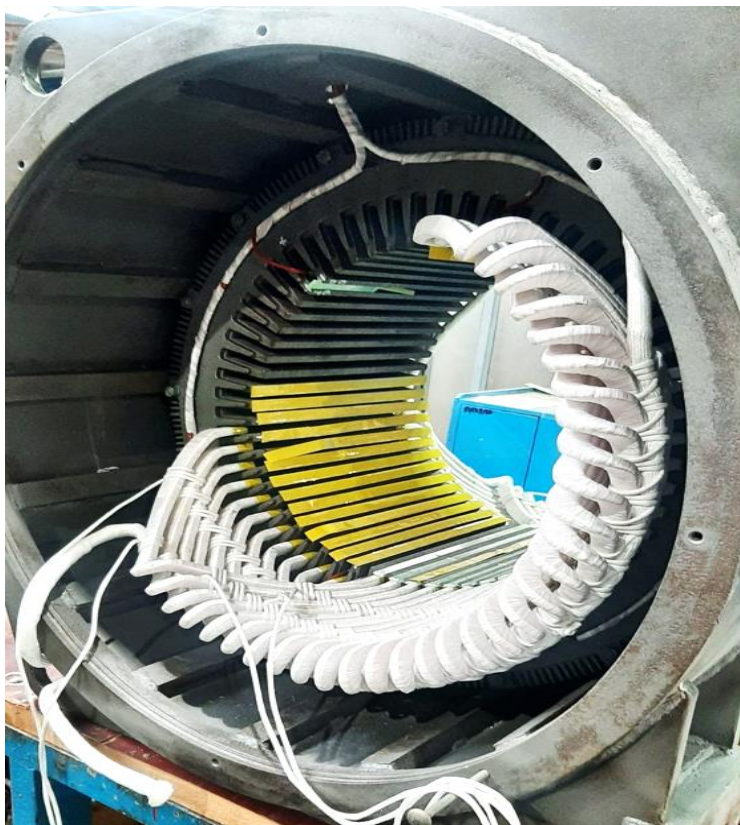


Sl. 5.1 Slobodno motani namotaj motora.

5.1.1.2. Namotaji sa formiranim statorskim namotajima - kanurama

Statori sa formiranim delovima namotaja, kanurama, su obično namenjeni mašinama koje rade na naponima od 1000 V i više. Takvi namotaji su napravljeni od izolovanih delova namotaja koji su prethodno tako oblikovani da se mogu umetnuti u žljebove u jezgro statora, Sl. 5.2. Izolacija provodnika može da bude na bazi liskuna i epoksidnih smola. Za više termičke klase koristi se izolacija provodnika tipa LGGL tj. emajl lak i kombinacija staklene svile i laka. Glavna izolacija može biti na bazi mikapapira i cikloalifatične epoksidne smole. [12] [48]

Kanura kao prethodno oblikovani deo namotaja se sastoji od profilisanog provodnika, sa mogućom dodatnom izolacijom preko određene grupe provodnika i glavnom izolacijom po površini kanure. Obično svaka kanura može imati od 2 do 12 navoja, a nekoliko kanura spojeno u seriju formira fazni namotaj statora. Pažljiv dizajn tokom proizvodnje omogućuje da je svaki zavoj u namotaju susedan sa drugim zavojem sa najmanjom mogućom razlikom potencijala.



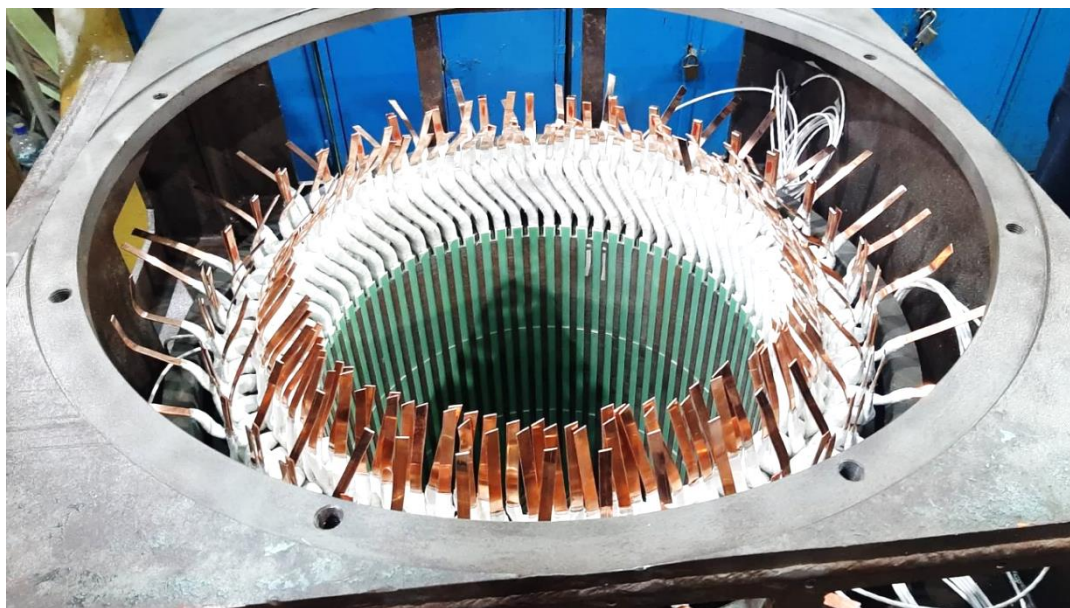
Sl. 5.2 Kanure umetnute u statorske žljebove.

5.1.1.3. Statori sa namotajem od polunavojaka - štapova

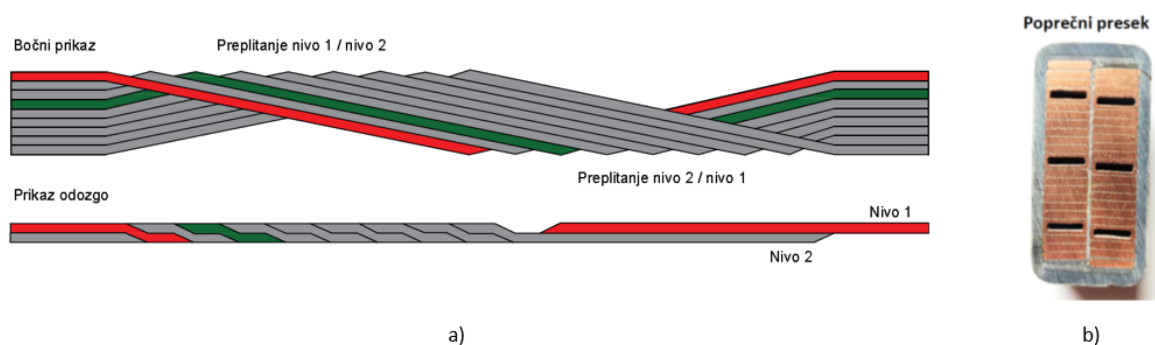
Kod velikih (krupnih) generatora, što je veća izlazna snaga to je i namotaj veći (krupniji) i mehanički čvršći. Kod formiranja namotaja uvek postoje poteškoće prilikom umetanja delova namotaja u uske žljebove jezgra statora uz stalni rizik od različitih mehaničkih oštećenja i naprezanja. Radi umanjenja navedenih rizika, većina statorskih namotaja velikih generatora se ne prave od kanura već od „polunavojka“, štapa. Tako se praktično samo jedna polovina kanure umeće u žleb što je znatno praktičnije nego umetanje cele kanure u dva žljeba istovremeno. Nedostatak štapnog namotaja je taj što je potrebno spajanje „polunamotaja“ na oba kraja štapa (Sl. 5.3).

Kao što je rečeno, kod slobodno motanih statorskih namotaja i kanura provodnik je neprekinut duž celog namotaja i kroz njega teče statorska struja. Presek provodnika diktira dozvoljena gustina struje. Za velike generatore, imajući u vidu dozvoljnu gustinu struje, efektivni poprečni presek provodnika mora biti jako veliki. Kada bi provodnik bio od punog materijala, efektivni presek bi bio značajno manji u odnosu na fizički poprečni presek zbog niza razloga. Osnovni razlog je značajna nehomogenost promenljivog magnetnog polja kroz provodnik što dovodi do jednake indukcije elektromotorne sile po dužini i po preseku provodnika. To bi dovelo do vrtložnih struja i povećanih gubitaka. Takođe, struja se potiskuje iz provodnika prema periferiji zbog skin efekta. Zbog toga se štapovi izrađuju od većeg broja elementarnih izolovanih provodnika koji se na krajevima spajaju tvrdim lemljenjem. Pored toga, štapovi se izrađuju po posebnoj proceduri nazvanoj *Rebelovanje*, po svom tvorcu. Kod konstrukcije Rebelovog štapa elementarni

provodnici duž štapa nisu paralelni već se, sa određenim korakom transpozicije, međusobno ukrštaju, Sl. 5.4. Ukrštanje se sprovodi da bi se u svim elementarnim provodnicima indukovala ista elektromotorna sila na krajevima, što omogućuje njihovo spajanje na početku i na kraju štapa. Kada elektromotorne sile nisu iste, dolazi do stvaranja lokalnih strujnih kontura i do pregrevanja štapa. Duž elementarnih provodnika potencijali nisu nužno isti što zahteva da oni budu međusobno izolovani. Napon između njih je manji od nekoliko desetina volti tako da izolacija može biti veoma tanka. Izolacija elementarnog provodnika je podložna oštećenju tokom proizvodnje namotaja, pa mora imati dobre mehaničke osobine. [12] [48]



Sl. 5.3 Formiranje namotaja statora od polunavojaka – štapova.



Sl. 5.4 Konstrukcija Rebelovog štapa; a) način transpozicije elementarnih izolovanih provodnika duž štapa, b) poprečni presek bakarnog Rebelovog štapa sa provodnicima sa vodenim hlađenjem [12]

Pored električnih postoje i mehanički razlozi za datu strukturu štapa. Veliki poprečni presek punog provodnika se teško savija u potreban oblik polunavojka/štapa. Provodnik

formiran od elementarnih provodnika lakše se savija u željeni oblik i mehaničke deformacije i unutrašnja naprezanja izolacije su znatno manja.

5.1.1.4. Osnovne karakteristike sistema izolacije namotaja statora

U skladu sa konstrukcijom namotaja statora, osnovne komponente sistema izolacije statora su: [12]

- izolacija elementarnih provodnika,
- međunavojna (međuslojna) izolacija,
- glavna izolacija.

a) Izolacija elementarnih provodnika

Svrha osnovne izolacije kod slobodno motanih namotaja i kod namotaja sa formiranim statorskim kanurama je da spreči kratke spojeve između provodnika susednih navojaka. Kratak spoj između navojaka jednog namotaja predstavlja sekundar autotransformatora u kratkom spoju. Kao rezultat, ogromna konturna struja će teći u neispravnom navojku pregrevajući ga. Obično se ovaj process završava spojem namotaja prema masi zbog prodiranja istopljenog bakra kroz izolaciju namotaja.

Kako je ranije naglašeno, pored naponskog naprezanja, namotaji su takođe izloženi mehaničkim i termičkim naprezanjima. Najveća mehanička naprezanja se javljaju u procesu formiranja navojaka što zahteva da se izolovani navojci savijaju pod velikim uglovima. To može dovesti do rastegnuća i pucanja izolacije. Zatim vibracije mašine deluju na zavoje tokom eksploatacije, prvenstveno na glave namotaja (mesta spajanja štapova izvan jezgra). Dodatno, tokom pokretanja mašine ili električnog kočenja pojavljuju se veoma velike prolazne elektromagnetne sile koje deluju na navojke. Iz istih razloga, prilikom pojave velikih struja kratkog spoja dolazi neizostavno do oštećenja namotaja.

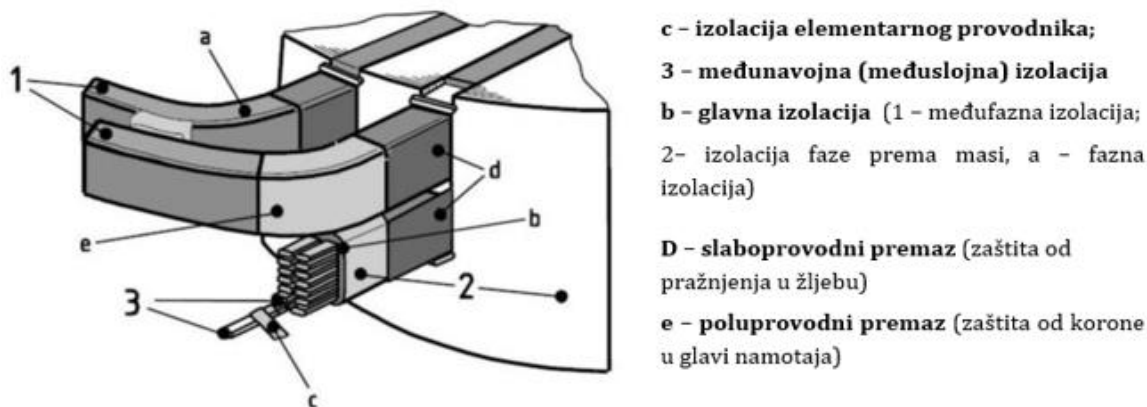
b) Međunavojna (međuslojna) izolacija

U statorima sa slobodno namotanim namotajem, osnovna izolacija žice može da funkcioniše kao izolacija navojka. Ponekad se nanosi dodatna izolacija na ključnim mestima da bi se povećala dielektrična čvrstoća izolacije zavoja.

Kod velikih mašina je neophodno formirati i međunavojnu odnosno međuslojnu izolaciju, u zavisnosti od konstrukcije namotaj (štapa, kanure) odnosno podužne razlike potencijala. Međuslojna izolacija mora imati dobre termičke karakteristike jer je izložena najvišim temperaturama u statoru. Iako proizvođači osiguravaju da ne dođe do kratkih spojeva elementarnih provodnika u novom namotaju, može doći do kratkih spojeva tokom eksploatacije i mehaničkog starenja. Par kratkih spojeva elementarnih provodnika u kanurama i štapovima neće prouzrokovati kvar namotaja, ali će izazvati veće gubitke u namotaju kao i povećanje lokalne temperature usled konturnih struja.

c) Glavna izolacija

Glavna izolacija je komponenta koja odvaja bakarne provodnike štapa ili kanure od jezgra statora. Kvar na glavnoj izolaciji štapa obično aktivira relejnu zaštitu od zemljospoja dovodeći do ispada mašine sa mreže. To ukazuje na značaj glavne izolacije statora za pravilan rad motora ili generatora. Za dug radni vek, izolacija mora da ispuni rigorozne električne, termičke i mehaničke zahteve zbog prisutnih naprezanja tokom eksploatacije.



Sl. 5.5 Složena struktura izolacionog sistema kod velikih obrtnih mašina [49]

Osnovna izolacija navojka, odnosno profilisanog bakarnog provodnika kod generatora, Sl. 5.5 (c), se izvodi najčešće pomoću elektroizolacionih lakova ili kompozitnih izolacionih traka.

Elektroizolacioni lakovi se koriste za izolaciju provodnika, sa sušenjem nakon nanošenja ili pečenjem u pećima. Pored elektroizolacije mogu se koristiti za površinsku zaštitu izolacionog sistema od mehaničkih ugrožavanja ili od prodora vlage. Za iste namene može se koristiti i poliester za impregnaciju.

Za zahtevniju namenu koriste se izolacione trake i folije sa liskunom, za izolovanje provodnika i namotaja u termičkoj klasi F i H, velikih snaga i napona do 15kV. Nosač liskuna može biti na bazi papira, staklene mrežice, termootpornih PET folija sa epoksidnim smolama kao vezivo. Uobičajene dimenzije za folije su 0.12-0.18x1000mm u rolni cca 100m., trake 0.12-0.20mmx10-25mmx50m.

Međunavojna, međuslojna izolacija, Sl. 5.5. (3), koristi se za grupu provodnika unutar štapa i izvodi se pomoću traka i folija na bazi liskuna ili poliesteru.

Glavna izolacija štapa, Sl. 5.5 (b), se izvodi pomoću traka i folija na bazi liskuna ili poliesteru uz korišćenje epoksidnih smola. Smole se koriste za impregnaciju, oblaganje, učvršćivanje, livenje, za nadogradnju nanošenjem i kao vezivo. Međufazna izolacija, Sl. 5.5 (1) i izolacija faze prema masi, Sl. 5.5 (2) je dodatna izolacija kao glavna izolacija kada treba rešiti određene zahteve opterećenja izolacionog sistema.

Poseban deo izolacionog sistema čini zaštita štapa od pojave površinskih pražnjenja u zoni žljeba i u zoni glave štapa (na izlasku štapa iz žljeba statora), Sl. 5.5 (d i e). Razlozi za

pojavu pražnjenja na površini štapa u žljebu su višestruki. Sa jedne strane, iz tehnoloških razloga, pojavljuje se zazor između štapa i zida žljeba. Zid žljeba se sastoji od magnetnih limova i ima izbočine i udoline koje sprečavaju dobar kontakt žljeba i glavne izolacije štapa. Sa druge strane, duž štapa se stvara električno polje (kao osnovna funkcija generatora) što znači da se duž glavne izolacije javlja tangencijalno električno polje odnosno isto toliko polje poprečno na paket lim. To polje bi dovelo do povremenih i nekontrolisanih preraspodela naelektrisanja odnosno do električnih pražnjenja koja bi erodirala izolaciju i paket lim. Da bi se to sprečilo, površina glavne izolacije se premazuje slaboprovodnim grafitnim slojem kojim se kontrolisano odvođe i preraspoređuju naelektrisanja. Otpornost nanetog sloja se proračunava tako da se kroz njega dopuštaju minimalno moguće lokalne struje između paket limova a da se pri tome ne pojavi kritično električno polje koje bi dovelo do varnice.

Poseban problem predstavlja izlazak slaboprovodnog sloja, odnosno štapa, izvan žljeba. Tu se pojavljuje veliki gradijent električnog polja zbog blizine štapa na visokom naponu ivicama žljeba magnetnog jezgra i slaboprovodnog sloja. Tu postoji mogućnost da lokalno električno polje pređe granicu pojave korone. Smanjenje gradijenta odnosno „razvlačenje“ električnog polja se postiže primenom poluprovodnih premaza od silicijum karbida. Silicijum karbid je poluprovodni materijal sa energetske procesom u interval (2,25 - 3,25) eV. Premaz od silicijum karbida se ponaša kao varistor, to jest naponski zavistan otpornik kod kojeg se sa povećanjem električnog polja u materijalu otpor smanjuje, odnosno ispoljava mali porast električnog polja u materijalu. Kada se nanese sloj na glavu namotaja, silicijum karbid ima veoma nizak otpor u oblasti visokog električnog polja na izlasku namotaja iz žljeba statora, i postepeno povećava svoj otpor kako se ide ka vrhu glave namotaja. Ovaj promenljivi otpor stvara električno polje na poluprovodnom premazu uniformnijim odnosno značajno se ublažava gradijent električnog polja. Tako se lokalno polje u svim tačkama zone glave smanjuje ispod kritičnih 3 kV/mm (u vazduhu) koje bi moglo da pokrene parcijalna pražnjenja.

Silicijum karbid kao premaz se dobija mešanjem sa rastvaračem i nosećom masom. Moguća je ugradnja pomoću prethodno pripremljenih traka kao nosećeg materijala. Dužina površinskog premaza od silicijum karbida zavisi od napona, ali je uobičajeno 5cm do 10 cm.

Poseban problem kod profilisanja gradijenta električnog polja u zoni glava namotaja je električni spoj slaboprovodnog i poluprovodnog sloja. Kada su slojevi nedovoljno kompatibilni pojaviće se značajna temperaturna zavisnost i nedovoljna otpornost na starenje spoja. Posledica je povećanje otpora na prelazima i povećan pad napona na njima odnosno povećan gradijent polja.

5.1.2. Nesavršenosti izolacionog sistema generatora

Nedostaci izolacionog sistema obrtnih mašina su po svojim elektro-mehaničkim karakteristikama vrlo raznovrsni. Sa stanovišta razumevanja proboja i parcijalnih pražnjenja izolacionih sistema kod visokonaponskih mašina moraju se sistematizovati

pojedini karakteristični tipovi defekata i nedostataka izolacionog sistema i utvrditi njihove elektro-mehaničke osobenosti. [50]

Na Sl. 5.6 dati su defekti izolacionog sistema generatora koji su relevantni za parcijalna pražnjenja. Mogu se podeliti na defekte i pražnjenja u unutrašnjoj izolaciji štapa u zoni žljeba i u zoni glave namotaja.

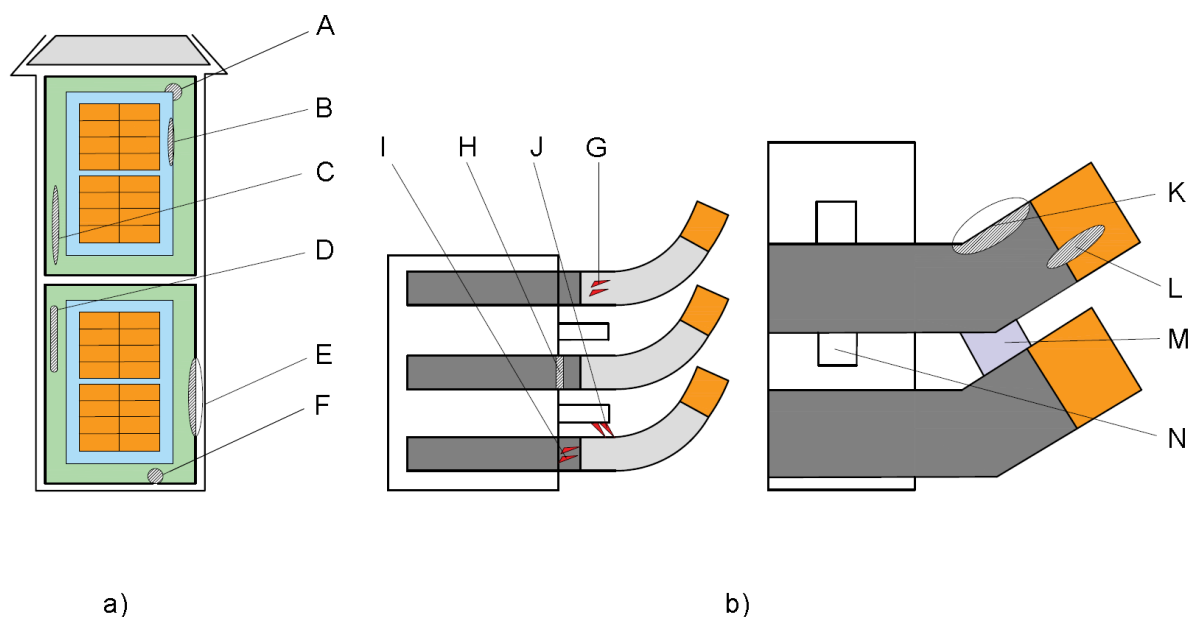
Defekti i pražnjenja u unutrašnjoj izolaciji štapa u zoni žljeba se mogu podeliti u nekoliko kategorija: [12] [51]

- A - nehomogenosti izolacije na ivicama provodnika i paketa limova.
- B - delaminacija izolacije pri provodniku
- C - unutrašnja delaminacija izolacije
- D - defekti tipa „električni žbun“ koji se grana između slojeva liskuna
- E - odvajanje i oštećenja izolacije kod poluprovodnog (niskootpornog) sloja u žljebu
- F - šupljina u izolaciji.

Defekti i pražnjenja na štapovima u glavi namotaja se dele u više kategorija:

- G - pražnjenja zbog velikog gradijenta polja u zoni završetka slaboprovodnog niskootpornog sloja u delu van žljeba i poluprovodnog visokootpornog sloja u nastavku za profilisanje potencijala na glavi štapa;
- H - pražnjenja na fragmentima oštećenog slaboprovodnog sloja;
- I - pražnjenja između oštećenog slaboprovodnog sloja i oštećenog profilisanog poluprovodnog sloja;
- J - pražnjenja između prsta pritiskne ploče i profilisanog poluprovodnog sloja;
- K - pražnjenja zbog raslojavanja izolacije na prevojima;
- L - pražnjenja zbog velikog gradijenta polja u zoni završetka profilisanog poluprovodnog sloja i izolacije glave štapa;
- M - pražnjenja po površini odstoynika zbog nedovoljnih razmaka za novonastale uslove;
- N - pražnjenja zbog ivičnih efekata u kanalima.

Na ivicama provodnika, pozicija A, dolazi do pojave nehomogenosti izolacije zbog tehnoloških postupaka kojima se formira izolacija kao i zbog karakteristika samog izolacionog materijala. Prilikom formiranja izolacije, materijal na ivicama se, zbog operacija savijanja, izlaže posebnim naprezanjima koja trajno remete strukturu izolacije. To može dovesti do unutrašnjih mikropukotina, dislokacije kompozitnih komponenti i tako dalje. Sa druge strane ovde se javlja efekat šiljka, u ovom slučaju ivice provodnika, koji dovodi do višestrukog lokalnog povećanja polja. To ukupno dovodi do pada otpornosti (postojanosti) izolacije na parcijalna pražnjenja na takvim mestima.



Sl. 5.6 Parcijalna pražnjenja i defekti izolacionog sistema [51]; a) defekti i pražnjenja u unutrašnjoj izolaciji štapa u zoni žljeba, b) defekti i pražnjenja u zoni glave namotaja

Delaminacija izolacije pri provodniku, pozicija B, obično se dešava kada je mašina preopterećivana, odnosno kada se bakarni provodnik ciklično pregrevao. Nejednake dilatacije provodnika i izolacije dovode do odvajanja izolacije od provodnika. Pojava je česta u staroj asfalt-liskun izolaciji i bez pregrevanja (tokom starenja). Kada se jednom naruši kompaktna veza izolacije i provodnika, može se očekivati dalje napredovanje oštećenja i tokom normalne eksploatacije mašine.

Unutrašnja delaminacija, pozicija C, se dešava starenjem tipičnim za epoksid-liskun izolaciju. Vremenom dilatacija materijala zbog preopterećenja, pregrevanja itd. dovodi do narušavanja unutrašnje strukture slojeva.

Defekat oblika razgranate strukture „električni žbun“ među slojevima liskuna, pozicija D, (na slici dat samo u poprečnom preseku) je posledica tehnologije formiranja liskunskih slojeva. U posebnim džepovima koji izgledom podsećaju na razgranato drvo, ostaje materijal (rastvarač, gas, vazduh itd.) koji narušava dielektričnu homogenost izolacije.

Odvajanje od zida žljeba, pozicija E, najčešće je uzrokovano vibracijom pojedinih delova mašine koje se direktno ili indirektno prenesu na žleb. Pojava je karakteristična za mašine kod kojih se razlabavi namotaj (popusti držanje klinova, defekti potpornih delova itd.) što dovodi do porasta vibracija štapa i daljeg razvoja defekta. Sa druge strane, iz više razloga, može doći do vibracija samog statora mašine, odnosno žljeba, što će neminovno dovesti do narušavanja mehaničke kompaktnosti strukture provodnik-izolacija-žleb.

Šupljina u izolaciji, pozicija F, najčešće je nastala iz tehnoloških razloga. Ovaj fenomen je tipičan za „tvrde“ izolacije (epoksidne smole na primer) sa nedovoljnim vakuumiranjem prilikom formiranja izolacionog sistema.

Takođe, na Sl. 5.6 prikazani su i defekti koji dovode do pražnjenja u zoni van žljeba, zoni glave štapa. Može doći do pojave pražnjenja između slaboprovodnog sloja i poluprovodnog sloja za profilisanje raspodele potencijala duž glave štapa (*G* detalj). Pražnjenje je posledica nastanka velikog lokalnog gradijenta polja, najčešće zbog gubitka dobrog kontakta između slaboprovodnog i poluprovodnog sloja, najčešće zbog temperaurnih dilatacija.

Tokom eksploatacije može doći do fragmentacije slaboprovodnog sloja (*H* detalj) najčešće nastalog zbog vibracija. Na fragmentima nastaju lokalna pojačanja polja koja dovode do pojave pražnjenja. Zbog pražnjenja (i daljeg prisustva prethodnih uzroka) degradacija ovog sloja se ubrzava, nakon čega nastaju intenzivna parcijalna pražnjenja zbog drastično narušene lokalne konfiguracije polja. Nastavak razvoja ovog defekta odnosno razaranja zone spoja slaboprovodnog i poluprovodnog sloja su jaka pražnjenja između fragmenata slojeva (*I* detalj) kao i pražnjenja između poluprovodnog sloja i mase (*J* detalj). Električna masa je najčešće stezni prst statorske pritisne ploče.

Kritična mesta za pražnjenje su takođe raslojavanja na prevojima štapa (*K* detalj) zbog neujednačenog omotavanja trakom koje se najčešće izvodi ručno. Takođe, mogu da nastanu površinska pražnjenja na diskontinuitetu poluprovodnog sloja za profilisanje potencijala i izolacije (*L* detalj), najčešće zbog novonastalih uslova kontaminacije površine ili tehničkih nedostataka.

Površinska pražnjenja nastaju i na površinama odstoynika ako su razmaci nedovoljni (*M* detalj), odnosno ako su nedovoljne dužine puznih staza za date radne uslove. Nedostaci mogu nastati tokom eksploatacije kontaminacijom površina. Uslovi za pražnjenja mogu nastati na diskontinuitetima u kanalima za hlađenje (*N* detalj) zbog jakog lokalnog ivičnog električnog polja i uslova rada.

5.2. Izolacioni sistemi visokonaponskih kablova

Osnovna namena elektroenergetskih kablova u elektroenergetskom sistemu (EES) je prenos i distribucija električne energije od napojnih i distributivnih transformatorskih i razvodnih postrojenja do potrošačkih centara, odnosno do grupnih i pojedinačnih potrošača električne energije. Takođe se koriste i kao unutrašnje veze u elektranama, razvodnim postrojenjima, industrijskim postrojenjima i dr. Elektroenergetski kabl, kao element EES treba da je usaglašen sa ostalim elementima u smislu naponskog nivoa i strujnog opterećenja.

5.2.1. Elementi konstrukcije energetskog kabla

Konstrukcija elektroenergetskog kabla prvenstveno zavisi od naponskog nivoa, odnosno naznačenog napona i od uslova polaganja: kao vazdušni kablovi, u zemlji, u vodi, u agresivnoj sredini, u prostorijama - na regalima, u cevima, ispod maltera i sl.

Osnovni konstrukcioni elementi energetskog kabla su dati u nastavku. [52] [53]

- **Provodnik** je metalni deo kabla namjenjen provođenju struje. Provodnik može biti puni, kada se sastoji od jedne žice (do 16 mm² preseka) ili uža, kada se sastoji od više žica (višežični).
- **Žica** je osnovni sastavni element provodnika, načinjen od provodnog materijala (bakar ili aluminijum).
- **Izolacija** je sloj od izolacionog materijala koji služi za električno izolovanje provodnika.
- **Žila** je izolovani metalni (višežični) provodnik. Sastoji od provodnika, izolacije i slaboprovodnih slojeva, ako postoje.
- **Jezgro kabla** je skup použenih žila, sa odgovarajućom ispunom, ako postoji.
- **Ispuna** je element kabla kojim se ispunjava međuprostor između žila višežilnih kablova, da bi se dobio kružni presjek kabla.
- **Plast (omotač)** je zaštitni sloj od polivinilhlorida (PVC) ili polietilena (PE) koji štiti elemente kabla od vlage i hemijskih uticaja, a u manjoj meri i od mehaničkih oštećenja.
- **Metalni plast** je bešavna cev od olova ili aluminijuma koja se postavlja preko jezgra kabla sa ciljem da štiti izolaciju od vlage i hemijskih ili mehaničkih oštećenja.
- **Armatura** je sloj od metalnih traka ili žica koji štiti kabl od prekomernih mehaničkih naprezanja i oštećenja kabla.
- **Slaboprovodni sloj (ekran kabla)** je sloj koji se postavlja ispod izolacije i iznad izolacije i služi za radialno oblikovanje i ograničenje električnog polja.
- **Električna zaštita** je metalni sloj koji služi za ograničenje električnog polja, za odvođenje struje zemljospoja i zaštitu od indirektnog dodira. Kod jednožilnih kablova električna zaštita se postavlja iznad slaboprovodnog sloja izolacije, dok kod trožilnih kablova ona može da se postavi preko svake žile ili da bude zajednička za sve žile.

Osnovna izolacija kod kablova može biti složena uz korišćenje više materijala. Najzastupljeniji su plastični ranije navedeni materijali. Kod starijih kablova koristi se uljna izolacija, uljno papirna izolacija, gas pod pritiskom i drugi.

Spoljašnja zaštita provodnika odnosno njegove izolacije od mehaničkih oštećenja i opterećenja, hemijskih i temperaturnih uticaja, kao i od prodora vode ili stranih tela postiže se izradom jednog ili više zaštitnih slojeva oko izolacije u zavisnosti od mesta eksploatacije odnosno načina polaganja. Zaštitni slojevi mogu biti:

- metalni plast,
- spoljašnji izolacioni plast,
- vodobubreći plast,
- armatura,
- unutrašnji zaštitni sloj (ili posteljica).

Metalni plašt je bešavna cev od olova ili aluminijuma koja se postavlja preko osnovnog kabla, sa ciljem da štiti izolaciju od vlage i hemijskih ili mehaničkih oštećenja. Ako je ispunjena načinjena od slaboprovodnog materijala, ona služi kao provodna veza između električne zaštite i slaboprovodnih slojeva oko žila kabla

Spoljašnji izolacioni plašt prekriva armaturu i osnovni mu je zadatak da zaštiti armaturu i ostale djelove kabla prvenstveno od hemijskih, odnosno korozivnih uticaja ali i izolacije od zemlje. On je najčešće izrađen od kompaund mase, impregniranih slojeva papirne trake ili jute ili kao termoplastični plaštev.

Vodobubreći plašt se pravi od vodobubreće trake koja u dodiru sa vlagom nabubri i čvrsto zaptiva mesta ulaska vode.

Armatura štiti kabl od mehaničkih oštećenja i opterećenja. Izrađuje se najčešće od čelične trake ili žice okruglog ili pljosnatog oblika.

Unutrašnji zaštitni sloj služi za razdvajanje metalnog plašta od armature (za zaštitu metalnog plašta). Izrađuje se najčešće od: kompaund mase, impregnirane papirne trake, impregnirane tekstilne trake, termoplastične ili kao termoplastični plaštev.

5.2.2. Tipovi energetske kablova

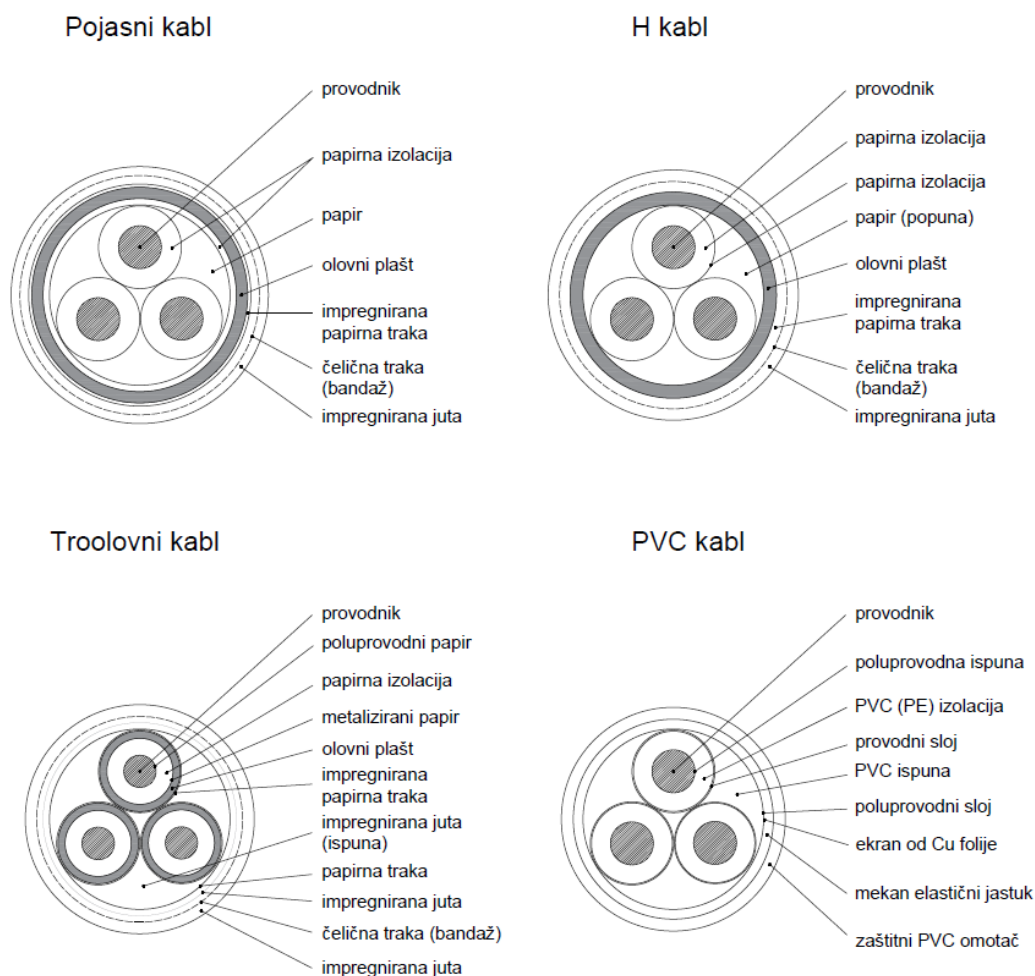
Zavisno od mesta na kojem se polaže kabl, kao i od načina polaganja kabla, primjenjuju se pojedini tipovi kablova sa odgovarajućim brojem i karakteristikama zaštitnih slojeva, Sl. 5.7.

Pojasni kablovi – koriste se do napona 15 kV, raspodjela linija električnog polja je nepravilna, samim tim električna naprezanja su u svim pravcima.

H kablovi – koriste se u srednjenaponskim mrežama, raspodjela linija električnog polja je radijalna. Zbog zajedničkog metalnog plašta su manje savitljivi.

Troolovni kablovi – koriste se do napona 60 kV. Linije električnog polja su radijalna oko svakog provodnika zbog olovnog plašta oko svakog provodnika. Savitljivi su i lakši za ugradnju od prethodnog tipa.

PVC kablovi – primena normalno do 20 kV, u nekim slučajevima do 40 kV. U odnosu na pojasne, troolovne i H kablove, PVC se koriste ako je trasa kratka i strma. Takođe, ako se ne mogu izbjeći oštri zavoji ili ako kabl mora biti lagan itd.



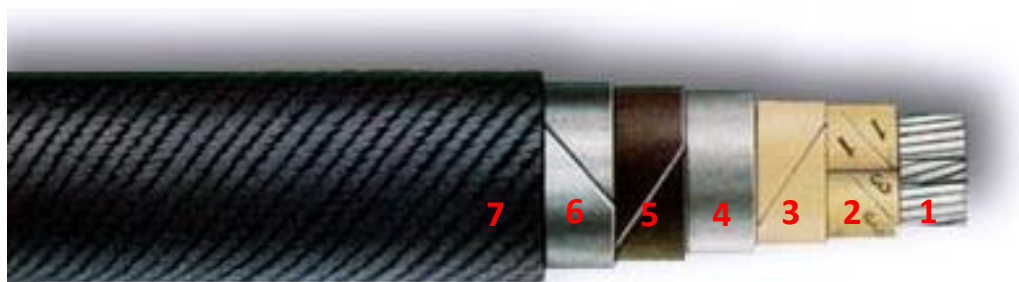
Sl. 5.7 Tipovi kablova u zavisnosti od mesta i načina polaganja [52] [53]

5.2.2.1. Kablovi izolovani papirom sa olovnim plaštom

Kabl sa papirnom izolacijom i olovnom unutrašnjim plaštom (PILC) je jedan od najstarijih tipova kablova za napajanje i postoji skoro sto godina. Odavno nema alternative koji bi mogao da se takmiči sa dokazanom pouzdanošću ovog tipa kabla i u mnogim zemljama većina instaliranih SN kablova je i dalje PILC. [53]

Na Sl. 5.8 prikazan je primer često korišćenog kabla tipa PILC. Fazni provodnici (1) mogu biti izrađeni od upletenog bakra aluminijuma ili čvrstog aluminijuma. Izolacija se sastoji od namotanih papirnih traka, koje su impregnisane u mešavinu ulja, voska i smole (2+3). Debljina žile i pojasne izolacije (3) zavisi od naponskog nivoa koji ide do 15 kV [54].

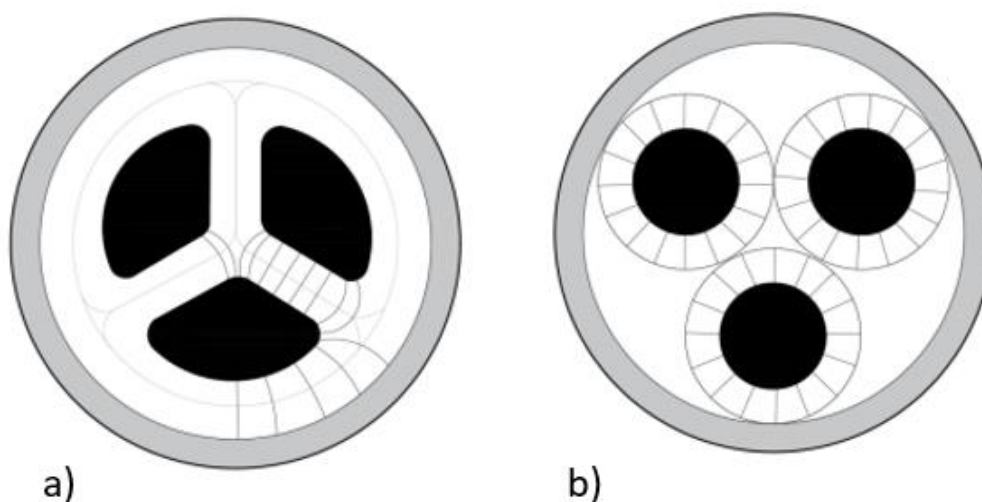
Plašt (4) je izrađen od bešavne cevi od olova ili olovne legure i služi za uzemljenje i sprečava ulazak vode. Unutrašnja zaštita (5) se sastoji od impregnisanog papira ili impregnisane jute sa premazima od bitumenske mase. Mehaničku zaštitu (6) čine čelične trake ili žice, a spoljnu zaštitu (7) impregnisana juta sa premazima od bitumenske mase. Polimerni omotač od PVC-a (polivinilhlorid) ili PE (polietilen) ponekad zamenjuje jutu i daje bolju zaštitu od npr. korozije zbog npr. lutajućih struja.



Sl. 5.8 PILC kabl sa naznačenim oblogama [52] [53]

Neke karakteristike PILC kablova su: robustnost, kompaktnost, neprekidnost ekrana za uzemljenje, visoka hemijska otpornost zbog olovnog omotača i dokazano dugog veka trajanja. Posebno zbog ove poslednje karakteristike, neka postrojenja još uvek favorizuju ovu vrstu kabla. Ovaj PILC kabl se u velikoj meri koristi za distributivne mreže.

Raspodela električnog polja kod PILC kablova data je na Sl. 5.9. Za više naponske nivoe (>15 kV) električno polje između provodnika postaje previsoko zbog njegove neravnomerne distribucije Sl. 5.9 a). Profilisanje polja svakog faznog provodnika se postiže faznim ekranima, Sl. 5.9 b).



Sl. 5.9 Električno polje u PILC kabl: a) pojasna konstrukcija, b) H tip kabla [53]

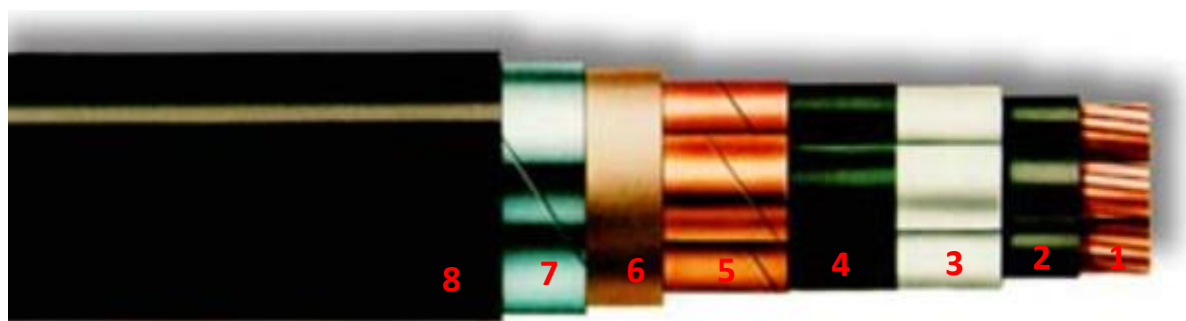
Ostale varijacije uključuju npr. upotrebu posebnog olovnog omotača oko svake žile i/ili primena poluprovodnih slojeva na kontaktu izolacija-metal ili, za optimizaciju kontrole polja. Maksimalna klasa napona za ovu vrstu kabla je 69 kV, iako se PILC kablovi 10 kV–35 kV najčešće koriste.

5.2.2.2. Ekstrudirani kablovi od čvrstog dielektrika

Postoji mnogo različitih dizajna polimernih kablova, primer jednofaznog XLPE (umreženi polietilenski) kabla je prikazan na Sl. 5.10. Detalji se mogu razlikovati za različite dizajne. Provodnik (1) može biti od bakra ili aluminijuma. Slaboprovodni sloj (često se naziva ekran provodnika) (2) oko provodnika služi za kontrolu polja na prelazu metal-izolacija.

Izolacioni materijal (3) može biti PE, koji se više ne koristi za nove instalacije, EPR (etilen-propilen-guma) ili XLPE. XLPE je daleko najpopularniji izbor, zbog manjih dielektričnih gubitaka i cene. Oko izolacije je ekran izolacije (4) preko koga se postavlja poluprovodna traka. Kao provodnik za uzemljenje koriste se bakarne ili aluminijumske žice ili folije (5). Žile se použavaju sa ispunom od odgovarajućeg materijala (6), koja služi kako bi se popunila šupljina između žila i za postizanje željenog oblika kabla. Armatura kabla se sastoji od dve pocinkovane čelične trake (7), a spoljni plašt kabla se izrađuje od PVC mase (8).

Osobine ekstrudiranih kablova su: niski gubici i relativna permitivnost, dugo očekivani životni vek, jednostavno rukovanje, velike dužine i, posebno ako se koristi XLPE, visoka maksimalna radna temperatura. Ekstrudirani kablovi nisu ograničeni na naponsku klasu. Maksimalne naponske vrednosti su do 500 kV. [55]



Sl. 5.10 Ekstrudirani kabl sa označenim oblogama [52] [53]

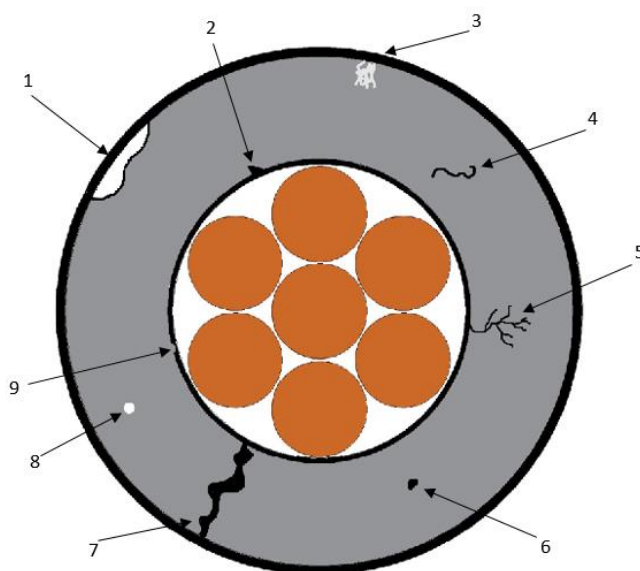
5.2.3. Nesavršenosti izolacionog sistema kablova

Defekti odnosno slaba mesta u izolacionom sistemu kabla mogu biti ugrađeni tokom proizvodnje ili polaganja kabla ili su pak nastali tokom eksploatacije. Uzroci defekata kablova mogu se podeliti u pet glavnih kategorija:

- nedostaci nastali u proizvodnji: šupljine u izolaciji, dielektrični ili metalni uključci u izolaciji, neadekvatna završna obrada metalnog ekrana, poluprovodnih slojeva itd.
- nepravilna instalacija kabla: nepravilno polaganje kabla (spojnice, završnice, savijanje) prekoračenje sile na kabl tokom polaganja itd.
- nepravilna primena: neadekvatan proračun maksimalne struje i struje kratkog spoja, napona i prenapona, varijacija opterećenja, temperature okoline, uslovi hlađenja kabla itd.
- nedostaci nastali spoljašnjim uticajem: mehanička oštećenja, oštećenja zbog hemijske reakcije, napad štetočina, građevinski radovi, sleganje objekata i terena itd.

Navedeni nedostaci, bez obzira na način nastajanja, dovode do ubrzane degradacije sistema izolacije kabla pri čemu se dešava sinergija procesa i dodatnog ubrzavanja degradacije.

Na Sl. 5.11 dati su defekti u izolacionom sistemu kabla. Defekat u vidu vodenog drveta ili žbuna (pozicija 1) nastaje u XLPE izolaciji kabla iz tehnoloških razloga, zbog nedovršenih procesa umrežavanja polietilena pri čemu dolazi do izdvajanja vode koja stvara datu žbunastu strukturu. Ta vodena struktura raste tokom vremena (pozicija 1') i može da formira kanal koji premosti izolaciju i dovede do kratkog spoja visokonaponskog provodnika i plašta. Defekat tipa raslojavanja (pozicija 2) je nehomogenost izolacionog sistema koja nastaje na jedan ili više, od pet, navedenih načina. Raslojavanja su moguća na razdvojnim površinama izolacija-slaboprovodni sloj, slaboprovodni sloj-provodnik. Pucanja izolacije, lom (pozicija 3) nastaju na neki od navedenih pet načina. Pozicije 4 - vazдушna šupljina i 5 - provodna izbočina nastaju u toku proizvodnje izolacionog sistema kabla zbog nesavršenosti proizvodnog procesa. Elektroprovodni kanali forme drveta ili žbuna (pozicija 6) nastaju tokom eksploatacije napredovanjem električnih pražnjenja i karbonizacijom kanala. Pojavljuju se razna oštećenja izolacionih i slaboprovodnih slojeva (pozicija 7). Različiti dielektrični ili provodni uključci (pozicija 8) uglavnom nastaju tokom proizvodnje.



Sl. 5.11 Defekti u izolacionom sistemu kabla. 1-raslojavanje (delamination), 2-provodna izbočina, šiljak, 3- vodeni žbun (water tree), 4-lom izolacije, 5-elektroprovodni žbun, 6- uključci, 7- kratkospojni kanal vodenog žbuna, 8-vazдушna šupljina, 9-oštećenje slaboprovodnog sloja [22]

Navedene kategorije nedostataka kabla su dinamička kategorija i povezane su sa uslovima i vremenom eksploatacije. Razvoj nedostataka odnosno slabljenje dielektrične čvrstoće izolacionog sistema kabla sa vremenom se naziva starenje.

6. STATISTIČKA OBRADA I ANALIZA REZULTATA

Veličine koje karakterišu stanje izolacionog sistema su prag pojave parcijalnih pražnjenja, probojni napon i vreme do proboja odnosno preostali životni vek. One su po svojoj suštini stohastične i podležu statističkim raspodelama. Osnovne mere su srednja vrednost i standardno odstupanje.

Ako se izvrši veliki broj merenja jedne iste fizičke veličine dobija se skup rezultata merenja $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$. Ako skup obuhvata sve rezultate on se naziva populacija. U slučaju merenja kontinualne promenljive broj elemenata skupa teži beskonačnosti. Izdvojeni određeni broj elemenata, podskup, zove se uzorak. [56]

Srednja vrednost populacije μ izračunava se kao aritmetička sredina rezultata merenja:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

gde je N broj elemenata skupa populacije. Na osnovu srednje vrednosti populacije mogu se definisati odstupanja pojedinih rezultata merenja od srednje vrednosti:

$$a_i = x_i - \mu$$

Vrednosti odstupanja (rasipanja) pojedinih rezultata merenja zavise od mnogo faktora, a mogu biti pozitivna i negativna. Kada postoji veliki broj nezavisnih uticaja, raspodela rasipanja vrednosti merenja je simetrična oko srednje vrednosti populacije. Kada postoje dominantniji uticaji na odstupanja njihova raspodela je asimetrična. Za izražavanje veličine odstupanja populacije koristi se statistička veličina standardno odstupanje:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}};$$

Zbir kvadrata odstupanja, kojih ima N , jednak je N puta kvadrat standardnog odstupanja σ^2 koji se zove disperzija, odnosno varijansa:

$$\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 = N \sigma^2$$

Normirano odnosno relativno standardno odstupanje se može izraziti kao:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\mu}$$

Ova veličina, relativno rasipanje, se koristi kod izražavanja ponovljivosti merenja u okolini srednje vrednosti.

Jedan od osnovnih zadataka statističke obrade rezultata je da se na osnovu uzoraka dobije što bolja aproksimacija karakteristika populacije tj. srednje vrednosti μ i standardnog odstupanja σ . Posmatrajmo uzorak, odnosno skup elemenata $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$. Kao najbolja aproksimacija srednje vrednosti populacije smatra se srednja vrednost datog uzorka:

$$x_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

gde je n broj elemenata skupa uzorka. Na osnovu srednje vrednosti uzorka mogu se definisati odstupanja pojedinih rezultata merenja od srednje vrednosti:

$$b_i = x_i - x_{sr}$$

Ukupan zbir svih odstupanja u skupu je nula, pa je taj podatak beskoristan. Zato se definiše standardno odstupanje uzorka od n članova, obeležava se sa s , i računa se preko izraza:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{sr})^2}{n - 1}}$$

i predstavlja najbolju aproksimaciju standardnog odstupanja σ .

6.1. Prikaz rezultata merenja pomoću histograma

Prilikom osnovne analize rezultata merenja može se primetiti da se oni nagomilavaju u određenom opsegu vrednosti. Dalje može se primetiti da postoji uska zona intenzivnijeg nagomilavanja gledano na ostatak opsega. Takođe, može se primetiti da nagomilavanje opada udaljavanjem od te zone. Takvo grupisanje rezultata može se slikovito prikazati grafički pomoću histograma. Za histogram se rezultati moraju prvo pripremiti. U skupu uzorka $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ rezultati se poređaju po veličini od minimuma do maksimuma. Tako se uočava opseg skupa ($x_{max} - x_{min}$) što omogućuje određenje razmere apscise na koju se sada nanose vrednosti iz skupa uzorka. Ukupan opseg u kome se nalaze svi rezultati merenja deli se na m jednakih intervala (segmenata) čiju se širina računa: [56]

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{m}$$

Broj intervala histograma m može se odrediti na više načina. Jedan od načina je da se izračuna kvadratni koren od broja članova uzorka n i da se tako dobijena vrednost zaokruži na prvi veći ceo broj:

$$m \cong \sqrt{n} \text{ (na veći ceo broj)}$$

Češće primenjivani način određivanja broja intervala je prema formuli:

$$m = 3,3 + \log n.$$

Na ordinatu se nanosi broj elemenata n_i u posmatranom intervalu Δx_i i taj broj se naziva učestalost. Pri grupisanju izmerenih podataka u pojedine intervale potrebno je voditi računa da svi rezultati merenja budu obuhvaćeni i da pojedini rezultati merenja budu samo u jednom od intrervalu. Zbir svih učestalosti treba da bude jednak broju elemenata uzorka n :

$$\sum_{i=1}^m n_i = n$$

Na ordinate se mogu nanostiti i relativna učestanost f_i za dati i -ti interval gde važi:

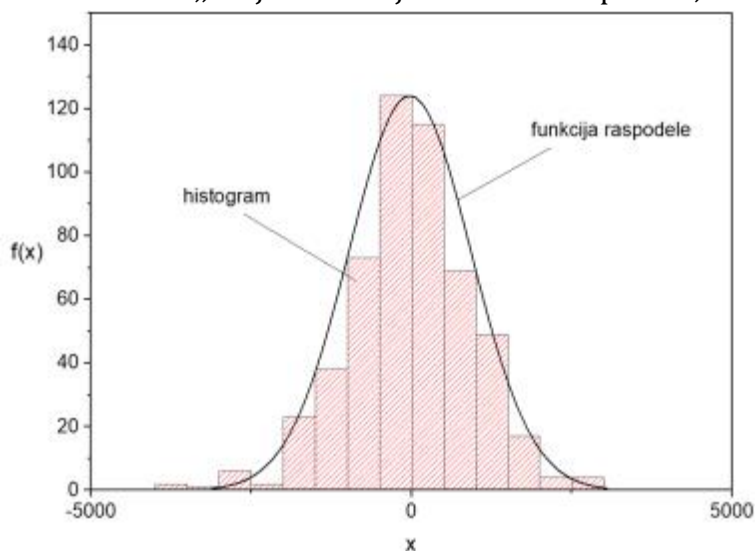
$$f_i = \frac{n_i}{n} (< 1)$$

$$\sum_{i=1}^m f_i = 1$$

U nekim slučajevima crta se normalizovani histogram kod koga se učestalost intervala deli sa širinom intervala histograma.

6.2. Statističke funkcije raspodele

Prikazivanje raspodele rezultata merenja preko histograma daje dobar uvid u karakter raspodele. Kada bi se povećavao broj elemenata skupa merenja dobijao bi se veći broj interval i finija struktura raspodele rezultata. Kada bi broj merenja težio beskonačnosti broj intervala bi težio beskonačnosti, raspodela rezultata bi postala kontinualna i dobila bi se funkcija raspodele. Ograničenja su da nije moguće dobiti skup velikog broja merenja. Čak i da je broj merenja ogroman, ne može se uvek dobiti analitički izraz za dobijenu raspodelu, već on može da se „fituje” sa manjim ili većim uspehom, Sl. 6.1.



Sl. 6.1 Fitovanje histograma funkcijom gustine raspodele.

Funkcija gustine raspodele $f(x)$ predstavlja envelopu histograma. Kako bi se olakšala analiza rezultata analitičkim funkcijama, osmišljen je veliki broj analitičkih funkcija, raspodela, koje mogu da dobro opišu najveći broj eksperimentalnih skupova podataka.

Ako za funkciju raspodele uzmemo analitičku funkciju $F(x)$, mogu se uspostaviti sledeće relacije: [56]

$$F(x) = \int_{x_{min}}^x f(x) dx$$

$$\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) dx = 1$$

Verovatnoća $P(x)$ da se neki mereni rezultat x pojavi u nekom definisanom intervalu vrednosti $(x_2 - x_1)$ je:

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$$

Takođe, mogu se definisati i srednja vrednost μ odnosno očekivana (najverovatnija) vrednost $E(x)$ i standardno odstupanje σ ili varijansa disperzija σ^2 odnosno $V(x)$ kao:

$$\mu = E(x) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot f(x) dx,$$

$$\sigma^2 = V(x) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} (x - \mu)^2 \cdot f(x) dx.$$

6.3. Analitičke funkcije raspodele

Postoji veliki broj funkcija statističkih raspodela razvijenih sa specifične primene. U osnovi svih raspodela je normalna Gausova raspodela. U elektrotehničkim istraživanjima najčešće se primenjuje troparametarska Vejbulova raspodela. [21] Pored nje koriste se Vejbulova dvoparametarska, eksponencijalna i druge.

6.3.1. Gausova normalna raspodela $N(\mu, \sigma^2)$

Najčešće korišćena funkcija raspodele kod statističke obrade rezultata merenja je Gausova ili normalna raspodela, oznake $N(\mu, \sigma^2)$. Kad se posmatra neki slučajni proces kod koga postoji veliki broj ravnopravnih uticaja, koji se ponavlja veliki broj puta, slučajna promenljiva ima tendenciju da ima normalnu raspodelu.

Gustina normalne raspodele $f(x)$ i raspodele $F(x)$ analitički se mogu opisati izrazima:

$$f_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

$$F_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

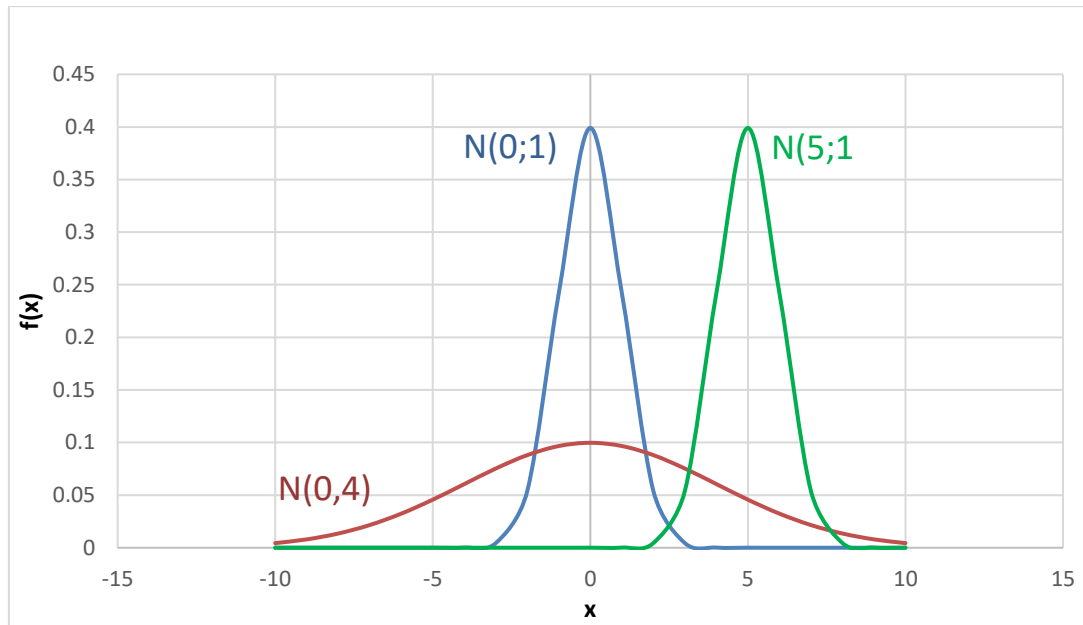
gde su μ srednja vrednost i σ standardno odstupanje.

Očekivana (najverovatnija) vrednost $E(x)$ i varijansa $V(x)$ odnosno disperzija su:

$$E(x) = \mu$$

$$V(x) = \sigma^2$$

Vrednost $E(x) = \mu$ određuje centar gustine funkcije raspodele, a vrednost $V(x) = \sigma^2$ karakteriše širinu gustine raspodele. Sl. 6.2 prikazana je Gausova raspodela za različite parameter $N(\mu, \sigma^2)$.



Sl. 6.2 Prikaz Gausove raspodele za različite parameter $N(\mu, \sigma^2)$.

6.3.2. Vejbulova troparametarska raspodela $W_3(U_a, \eta, \beta)$

Najčešće korišćena raspodela u analizi rezultata u tehnici je troparametarska Vejbulova raspodela, oznake $W_3(U_a, \eta, \beta)$. Parametar U_a je prag, minimalna vrednost promenljive U , parameter η služi za skaliranje ili normiranje promenljive U a parameter β određuje formu odnosno (a)simetričnost gustine raspodele. Osnovne karakteristike raspodele su joj te da ima minimalnu vrednost promenljive što je u tehnici slučaj, da ima određeni domen promenljive koji se normira i da je gustina raspodele asimetrična, što je najčešće realni slučaj.

Analitički izrazi za gustinu Vejbulove raspodele $f(U)$ i raspodelu $F(U)$ su:

$$f(U) = f(U, U_a, \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^\beta}$$

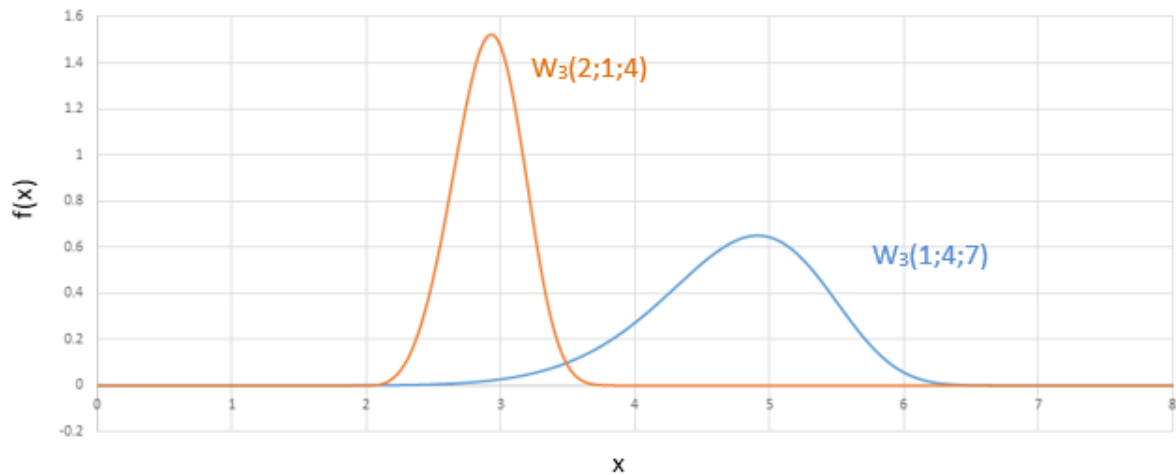
$$F(U) = F(U, U_a, \eta, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^\beta}$$

Očekivana (najverovatnija) vrednost $E(x)$ i varijansa $V(x)$ odnosno disperzija su:

$$E(x) = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$V(x) = \eta^2 \Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \eta^2 \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Na Sl. 6.3 dat je prikaz Vejbulove troparametarske raspodele u funkciji parametara (U_a, η, β) za neke karakteristične slučajeve.



Sl. 6.3 Prikaz Weibulove raspodele u funkciji parametara $W_3(U_a, \eta, \beta)$.

6.3.3. Weibulova dvoparametarska raspodela $W_2(\eta, \beta)$

Weibulova dvoparametarska raspodela, oznake $W_2(\eta, \beta)$ se koristi kada je parametar $U_a = 0$ to jest minimalna vrednost promenljive U može biti nula. Kao i kod Weibulove troparametarske, parameter η služi za skaliranje ili normiranje promenljive U a parameter β određuje formu odnosno (a) simetričnost gustine raspodele. Osnovne karakteristike dvoparametarske raspodele su slične osobinama troparametarske, tj da ima minimalnu vrednost promenljive nula, što je u tehnici primenjivo, da ima određeni domen promenljive koji se normira i da je gustina raspodele asimetrična, što je najčešće realni slučaj.

Analitički izrazi za gustinu Weibulove dvoparametarske raspodele $f(U)$ i raspodelu $F(U)$ su:

$$f(U) = f(U, \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{U}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{U}{\eta}\right)^\beta}$$

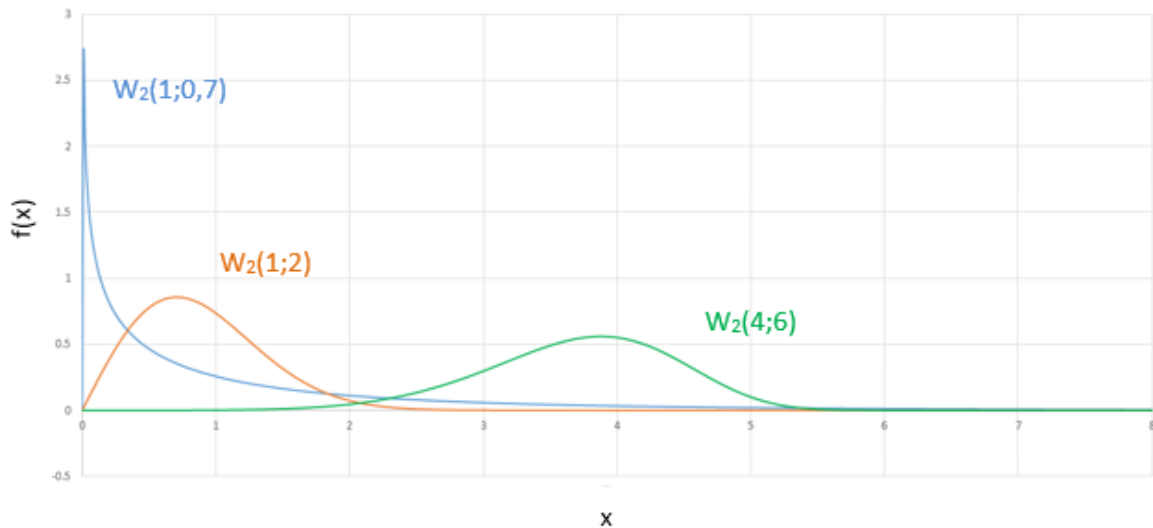
$$F(U) = F(U, \eta, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{\eta}\right)^\beta}$$

Očekivana (najverovatnija) vrednost $E(x)$ i varijansa $V(x)$ odnosno disperzija su:

$$E(x) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

$$V(x) = \eta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \eta^2 \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Na Sl. 6.4 dat je prikaz dvoparametarske Weibulove raspodele u funkciji parametara (η, β) za neke karakteristične slučajeve.



Sl. 6.4 Prikaz dvoparametarske Vejbulove raspodele u funkciji parametara $W_2(\eta, \beta)$.

6.3.4. Eksponecijalna dvoparametarska raspodela $E_2(U_a, \eta)$

Eksponecijalna dvoparametarska raspodela, oznake $E_2(U_a, \eta)$ se koristi kada minimalna vrednost promenljive U može biti $U_a \geq 0$. Kao i kod nekih drugih raspodela parameter η služi za skaliranje ili normiranje promenljive U . Osnovne karakteristike eksponecijalne dvoparametarske raspodele je da ima minimalnu vrednost promenljive (prag), što je u tehnici primenjivo, da ima određeni domen promenljive koji se normira i da je gustina raspodele izrazito asimetrična, što može biti u nekim realnim slučajevima. Može se dobiti iz Vejbulove raspodele za $\beta = 1$.

Analitički izrazi za gustinu eksponecijalne dvoparametarske raspodele $f(U)$ i raspodelu $F(U)$ su:

$$f(U) = f(U, U_a, \eta) = \frac{1}{\eta} e^{-\left(\frac{U-U_a}{\eta}\right)}$$

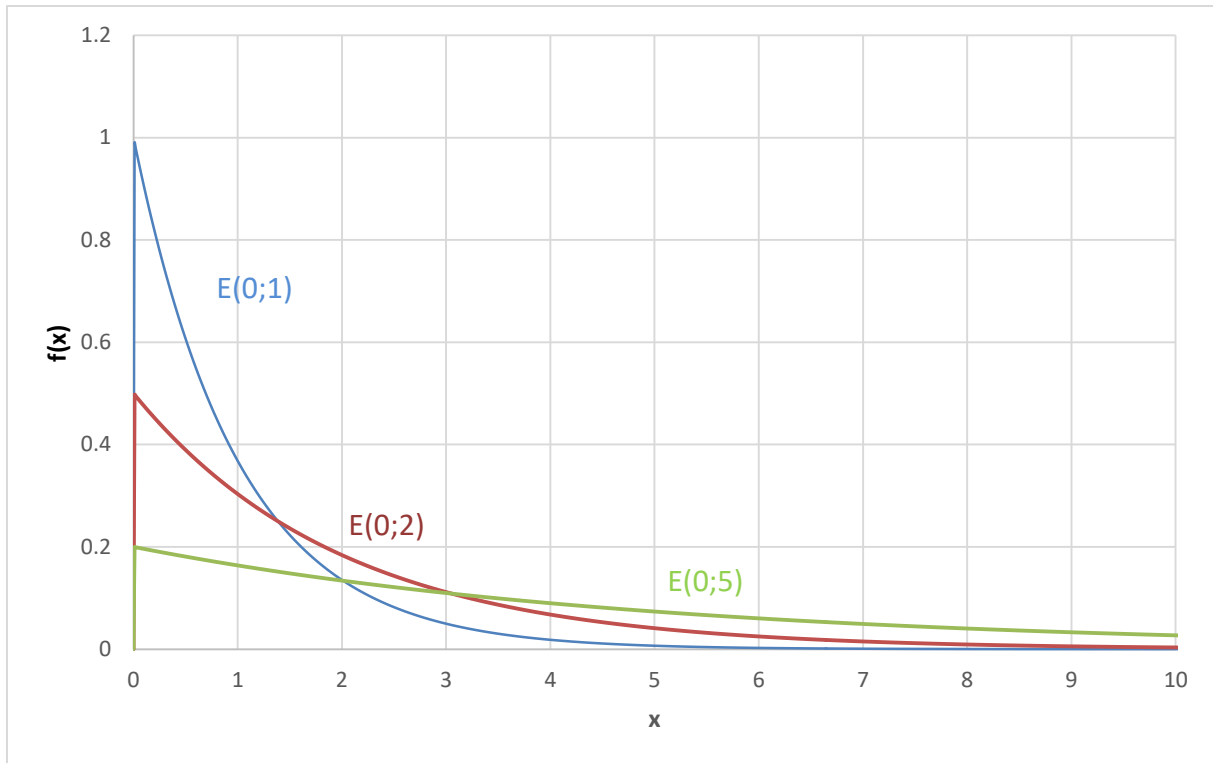
$$F(U) = F(U, U_a, \eta) = 1 - e^{-\left(\frac{U-U_a}{\eta}\right)}$$

Očekivana (najverovatnija) vrednost $E(x)$ i varijansa $V(x)$ odnosno disperzija su:

$$E(x) = U_a + \eta$$

$$V(x) = \eta^2$$

Na Sl. 6.5 dat je prikaz eksponecijalne dvoparametarske raspodele u funkciji parametara (U_a, η) za neke karakteristične slučajeve.



Sl. 6.5 Prikaz eksponencijalne dvoparametarske raspodele u funkciji parametara $E_2(U_a, \eta)$

6.4. Ispitivanje hipoteza raspodela

Eksperimentalni rezultati slučajne promenljive formiraju određenu empirijsku raspodelu, koja se može aproksimirati nekom analitičkom funkcijom raspodele matematičke statistike sa manjim ili većim slaganjem odnosno značajnošću. Procena značajnosti sa kojom skup empirijskih rezultata pripada pretpostavljenoj raspodeli H , kao hipotezi, može da se odredi različitim testovima. Najrasporstranjeniji su χ^2 test i Kolmogorov Smirnov test. [57] [58]

6.4.1. Test hi-kvadrat χ^2

Test χ^2 se primenjuje kako za kontinualne stohastičke promenljiva tako i za diskretne. Veličine koje se razmatraju (probojni napon, prag parcijalnih pražnjenja, vreme do proboja) su kontinualne i razmatraju se preko kontinualnih raspodela. U tom slučaju za potreba χ^2 testa vrši se pretvaranje u diskretne vrednosti, odnosno koriste se histogrami eksperimentalnih rezultata.

Analizom histograma, dobija se m eksperimentalnih vrednosti pojedinih grupa sa relativnim frekvencijama $f_i(x_i)$ za promenljive x_i . Njima odgovaraju teorijske frekvencije $f_{ti}(x_i)$ koja se dobija izračunavanjem pomoću pretpostavljene teorijske raspodele H . Teorija pokazuje da je veličina: [57]

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(f_i(x_i) - f_{ti}(x_i))^2}{f_{ti}(x_i)}$$

distribuirana po zakonu χ^2 raspodele sa stepenom slobode k koji zavisi od broja grupa m i od broja parametara s pretpostavljene raspodele H , prema formuli:

$$k = m - 1 - s$$

Ako bismo pravili više serija eksperimenata sa po m grupa merenih rezultata i primenili istu procedure nalaženja χ^2 vrednosti, dobili bismo niz vrednosti koje se pokoravaju više ili manje zakonu χ^2 raspodele. Ako je razlika teorijskih i empirijskih odgovarajućih grupa relativno mala i slučajnog karaktera, ni vrednosti χ^2 neće biti velike, što dopušta prihvatanje hipoteze H kao moguće raspodele. U protivnom pretpostavljena hipoteza se mora odbaciti.

Neka je $\chi^2_{1-\alpha}$ takva vrednost varijable za koju važi relacija:

$$P\{\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha}\} = \alpha$$

tada interval $(0, \chi^2_{1-\alpha})$ predstavlja područje prihvatljivosti hipoteze, dok je interval $(\chi^2_{1-\alpha}, \infty)$ područje odbacivanja hipoteze H . Za nivo signifikantnosti α najčešće se uzima vrednost $\alpha=0,05$, što praktično znači, prema pomenutom kriterijumu, da se pravi greška od najviše 5 % u slučaju odbacivanja hipoteze.

6.4.2. Kolmogorov Smirnov test

Test Kolmogorova se bazira na teoriji koja daje relaciju između empirijske raspodele $\bar{F}_n(x)$ dobijene na osnovu uzimanja uzoraka veličine n , i pretpostavljene raspodele $F_n(x)$, promenljive x . Teorija kaže da se funkcija $\bar{F}_n(x)$ može smatrati aproksimacijom stvarne raspodele $F_n(x)$ u slučaju kada $n \rightarrow \infty$ i kada su ispunjeni određeni uslovi. [59] [60] Naime, ako uvedemo parametar odstupanja eksperimentalne raspodele od teorijske D_n kao:

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |\bar{F}_n(x) - F_n(x)|$$

tada za bilo koju neprekidnu funkciju raspodele važi:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(D_n < \frac{\lambda}{\sqrt{n}}) = Q(\lambda)$$

gde je

$$Q(\lambda) = \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k e^{-2k^2 \lambda^2}$$

Odavde sledi da se za $n \rightarrow \infty$ sa velikom verovatnoćom može reći da eksperimentalna raspodela konvergira teorijskoj raspodeli.

Prema teoriji Kolmogorova, ako imamo uzorak $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, tada prihvatljivost pretpostavljene hipoteze testiramo preko parametra D_n koga nalazimo prema relaciji:

$$D_n = \max_{m=1,2,\dots,n} \left[\frac{m}{n} - F(x_m) \right]$$

Kritično područje za prihvatanje hipoteze određuje se prema relaciji:

$$D_n > K_{n,\alpha}$$

gde je $K_{n,\alpha}$ dvoparametarska funkcija, zavisna od veličine uzorka n i odabranog koeficijenta signifikantnosti α . Za velike vrednosti n važi

$$K_{n,\alpha} \cong \frac{\lambda_{1-\alpha}}{\sqrt{n}}$$

gde je $\lambda_{1-\alpha}$ vrednost koja zadovoljava relaciju:

$$Q(\lambda_{1-\alpha}) = 1 - \alpha.$$

6.4.3. Man Vitni test (U test)

U test (Mann-Whitney Test ili Wilcoxon Rank Sum Test spada u neparametarske testove koji se primenjuje na uzorke koji nisu normalno raspodeljeni i treba da odredi da li dva nezavisna uzorka potiču iz iste populacije. [58] [61]

Nulta hipoteza: $H_0(F(x)=F(y))$

gde su $F(x)$ i $F(y)$ funkcije raspodele dveju populacija, $x_1, \dots, x_i, \dots, x_{n_x}$ i $y_1, \dots, y_j, \dots, y_{n_y}$ slučajne promenljive tih funkcija a n_x i n_y veličine uzoraka.

Vrednosti uzoraka ($n_x + n_y$) su poređani po veličini i numerisani od 1 do ($n_x + n_y$). Zatim računamo sumu rangova za svaki uzorak kao:

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

gde su $r(x_i)$ i $r(y_j)$ brojevi imenovani rangovima.

Varijabla U se definiše kao $U = \min(u_x, u_y)$. Dalje imamo:

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

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

Vrednost varijable U se očitava iz odgovarajućih tablica za uzorke manje od 20, ili korišćenjem aproksimacije z koja se računa kao:

$$z = \frac{U - \frac{N_1 N_2}{2}}{\sqrt{\frac{N_1 N_2 (N + 1)}{12}}}$$

Ako je $z \leq Z_\alpha$, gde Z_α predstavlja kritičnu vrednost, prihvata se nulta hipoteza H_0 . Ako je $z \geq Z_\alpha$ nulta hipoteza se odbacuje.

6.5. Metode procene parametara raspodele

6.5.1. Metoda maksimalne verodostojnosti

Metoda maksimalne verodostojnosti ili MLE metoda jedna je od najpoznatijih statističkih metoda za procenu parametara neke raspodele. Razlog tome je što se može primeniti na većinu teorijskih raspodela i što pod određenim uslovima ima jako dobra statistička svojstva kao što su invarijantnost, konzistentnost i asimptotska nepristranost.

Neka su $x_1, x_2, \dots, x_n$ nezavisne realizacije slučajne varijable $X > 0$ sa funkcijom gustine $f(x, \theta)$. Odgovarajuća funkcija verodostojnosti je definisana kao: [19] [20] [62]

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^n f(x_i; \theta).$$

gde $L: \theta \rightarrow [0, \infty]$. Bez smanjenja uopštenosti možemo pretpostaviti da je:

$$x_1 < x_2 < \dots < x_n$$

Procena metodom maksimalne verodostojnosti je vrednost parametra $\hat{\theta}$ koji maksimizuje $L(\theta) = \sum_{i=1}^n f(x_i; \theta)$ na skupu svih mogućih vrednosti vektora parametara θ . Budući da je logaritamska funkcija strogo rastuća, problem maksimizacije funkcije $L(\theta)$ ekvivalentan je problem maksimizacije funkcije $\ln L(\theta)$.

ML procenitelj za dvomparametarsku Vejbulovu raspodelu postoji i jedinstven je, dok to nije slučaj za troparametarsku Vejbulovu raspodelu.

Za bilo koju realizaciju

$$0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n$$

troparameterske Vejbulove slučajne promenljive X standardni ML procenitelj ne postoji.

Ako fiksiramo $\beta \in (0,1)$ i $\eta \in (0,\infty)$ tada:

$$f(t_1; \alpha, \beta, \eta) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t_1 - \alpha}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_1 - \alpha}{\eta}\right)^\beta} \rightarrow \infty$$

kada $\alpha \rightarrow t_1$ sleva.

Osim toga, $\forall i = 2, \dots, n$ važi:

$$f(t_i; \alpha, \beta, \eta) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t_1 - \alpha}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_1 - \alpha}{\eta}\right)^\beta} \rightarrow \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t_i - t_1}{\eta}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{t_i - t_1}{\eta}\right)^\beta} > 0$$

Zbog toga je:

$$\lim_{\alpha \rightarrow t_1} L(\alpha, \beta, \eta) \rightarrow \infty$$

Da bi ML procenitelj postojao limes funkcije verodostojnosti mora biti konačan, što ovde nije slučaj.

Za troparametarsku Vejbulovu raspodelu funkcija verodostojnosti je zadana kao:

$$L_3(\alpha, \beta, \eta) = \frac{\beta^n}{\eta^{\beta n}} \left[\prod_{i=1}^n (t_i - \alpha)^{\beta-1} \right] e^{-\frac{1}{\eta\beta} \sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^\beta}.$$

Uprkos nepostojanju ML procenitelja za troparametarsku Vejbulovu slučajnu promenljivu X, problem procene parametara se posmatra kroz rešavanje sistema jednačina dobijene izjednačavanjem parcijalnih izvoda sa nulom. Tj:

$$\begin{aligned} \eta^\beta - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^\beta &= 0, \\ \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^\beta \ln(t_i - \alpha)}{\sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^\beta} - \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^n \ln(t_i - \alpha) &= 0, \\ (\beta - 1) \sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^{-1} &= \beta \eta^{-\beta} \sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^{\beta-1} = 0. \end{aligned}$$

uz uslov da je $\alpha \leq t_1$. Ove jednačine se zovu jednačine verodostojnosti.

6.5.2. Modifikovana metoda maksimalne verodostojnosti

Kako bi se postigla asimptotska normalnost procenitelja nastalih metodom maksimalne verodostojnosti, koristimo modifikovanu metodu maksimalne verodostojnosti.

Metoda se zasniva na tome da se jednačina verodostojnosti: [20] [63]

$$(\beta - 1) \sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^{-1} = \beta \eta^{-\beta} \sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^{\beta-1}.$$

za α zameni sa alternativnim jednačinama u sledećim oblicima:

$$\begin{aligned} -\ln\left(\frac{n}{n+1}\right) &= \frac{(t_{(1)} - \alpha)^\beta}{\eta^\beta}, \\ \alpha + \left(\frac{\eta}{\beta}\right) \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) &= t_{(1)}, \\ \alpha + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) &= \bar{t}, \\ \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] &= s^2, \\ \alpha + \eta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} &= t_{med}, \end{aligned}$$

gde je t_{med} medijana uzorka, a Γ je tzv. gama funkcija definisana formulom

$$\Gamma(u) = \int_0^{\infty} t^{u-1} e^{-t} dt.$$

Ovnovna svojstva te funkcije su:

- 1) $\Gamma(1) = 1$, $\Gamma(u) = (u-1) \Gamma(u-1)$ za $u > 1$, odakle sledi $\Gamma(n) = (n-1)!$ za prirodan broj n ;
- 2) Za svaki prirodan broj n je $\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdots (2n-1)}{2^n} \sqrt{\pi}$

Procene modifikovanom metodom maksimalne verodostojnosti dobijamo rešavanjem sledećeg sistem jednačina:

$$\eta = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}},$$

$$\beta = \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^\beta \ln(t_i - \alpha) \right] \left[\sum_{i=1}^n (t_i - \alpha)^\beta \right]^{-1} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i - \alpha) \right\}^{-1}$$

i vraćanjem u neku od prethodnik jednačina, u zavisnosti koja veličina se posmatra.

6.5.3. Metoda momenata

Metoda momenata se bazira na pretpostavci da su vrednosti statističkih momenata izračunatih na datom uzorku $t_1, t_2, \dots, t_n$ bliske vrednostima teorijskih momenata verovatnoće raspodele, odnosno statistički momenti izračunati na datom uzorku (momenti uzoraka) izjednačavaju se sa teorijskim momentima. Nedostatak metode momenata je taj što uzorak mora biti dovoljno velik.

Koristeći metodu momenata, parametri Vejbulove raspodele se procenjuju koristeći očekivanje i varijansu: [20] [62]

$$\mu = E(T) = \alpha + \eta \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]$$

$$s^2 = \eta^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 \right\}$$

Treći centralni moment je:

$$\mu_3 = E(T - \mu)^3 = \eta^3 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{3}{\beta}\right) - 3 \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) + 2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^3 \right\}$$

Nepoznate parametre α , β i η dobijaju se rešavanjem sistema jednačina koji se dobijaju izjednačavanjem momenata uzoraka sa odgovarajućim teorijskim momentima:

$$t = \alpha + \eta \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]$$

$$s^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 \right]$$

$$\mu_3 = \eta^3 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{3}{\beta}\right) - 3 \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) + 2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^3 \right\}$$

gde su:

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n},$$

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(t_i - t)^2}{n},$$

$$\mu_3 = \sum_{i=1}^n \frac{(t_i - t)^3}{n}.$$

6.5.4. Modifikovana metoda momenata

Modifikovana metoda momenata koristi jednačine za prvi i drugi moment a jednačina trećeg centralnog momenta se zamenjuje jednačinom za najmanju uređajnu statistiku. Ona je data kao: [20] [63]

$$E(T_{(1)}) = \alpha + \frac{\eta}{n^{\frac{1}{\beta}}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

7. ZAKON PORASTA VEROVATNOĆE I MODELOVANJE

Zakon porasta verovatnoće određenog ishoda se odnosi na ishode koji su implicitna funkcija neke veličine vezane za uzorak. Zakon iskazuje porast verovatnoće posmatranog ishoda, koji mora imati stohastičku prirodu, kada dođe do porasta samo date veličine sa porastom uzorka. Brojni su primeri primene ove zakonitosti u istraživanjima iz najrazličitijih oblasti. Na primer, kada se posmatraju ishodi na nekim uzorcima (podskup pojedinačnih uzoraka izuzetih iz populacije) koji rastu po određenoj skali (na primer uzorci imaju sve više članova) može se uočiti zakonitost po kojoj se, na osnovu skale porasta uzoraka, procenjuje konvergencija verovatnoće ishoda za celu populaciju. Da bi procena verovatnoće bila moguća na eksplicitan matematički način (analitička funkcija statističke raspodele), svi članovi uzoraka moraju biti međusobno nezavisni u odnosu na verovatnoću posmatranog ishoda. Kada postoji funkcionalna povezanost članova (pod)skupa ili memorijski efekat događaja onda ne postoji jednoznačno analitičko rešenje za funkciju raspodele graničnog ishoda u odnosu na populaciju. [64]

U elektrotehnici su brojni primeri primene zakona porasta verovatnoće, pre svega kod izolacionih sistema. Stohastičke promenljive koje se mogu posmatrati u kontekstu verovatnoće događaja su probojni napon, prag pojave parcijalnih pražnjenja, preskok, vreme do proboja (otkaza) i niz drugih. Konkretno, zakon porasta verovatnoće ishoda, na primer za proboj, izražava analitičku zakonitost koja opisuje pojavu smanjenja probojnog napona sa porastom uzorka, pri čemu svi delovi uzorka moraju biti pod istim uslovima. Na primer, porast broja izolatora, pod istim uslovima naponskog naprezanja, u sistemu izolacije vodova dovodi do povećanja verovatnoće proboja na nižim naponima (prenaponima). Isto se može uočiti kod izolacionog sistema generatora gde sa povećanjem broja štapova u statorskog namotaju dolazi do povećanja verovatnoće proboja na nižim naponima. Pored porasta broja diskretnih članova uzoraka može se posmatrati porast kontinualnog skupa, u ovom slučaju porast aktivne površine objekta kao kod povećanja dužine visokonaponskih kablova ili vodova.

Destruktivna ispitivanja izolacionog sistema, kao što je na primer probojni napon, su moguća samo na uzorcima ili delovima izolacionog sistema. Nikako to nije moguće raditi na izvedenom objektu namenjenom za eksploataciju. Zakon porasta verovatnoće ukazuje na to na koji način i koliko ispitivanja (eksperimenata) je potrebno uraditi na uzorcima odnosno modelima izolacionog sistema kako bi se pouzdano procenio, na primer probojni napon, kod prototipa ili izvedenog objekta. Zakon porasta ukazuje da je potrebno izvršiti jako puno eksperimenata na uzorcima i modelima određenog objekta da bi se utvrdili parametri raspodele odnosno verovatnoće ishoda, na primer proboja. Međutim, dobijeni parametri omogućuju pouzdanu procenu probojnog napona za svaki proizvod iz iste kategorije, što se želelo postići. Isti postupak se primenjuje i za ostale navedene veličine kao što su prag parcijalnih pražnjenja, vreme do proboja i druge.

Od samog početka razvoja visokonaponske tehnike uočeno je da se verovatnoća proboja povećava sa povećanjem objekta odnosno povećanjem izolacionog sistema. Sa ukupnjavanjem objekata (za iste uslove i veličine eksploatacije) smanjivala se izolaciona

čvrstoća odnosno probojni napon, povećavala se aktivnost parcijalnih pražnjenja, smanjivalo vreme do otkaza (proboja ili nekog drugog otkaza). Intuitivno je bilo jasno da se sa prostornim povećanjem objekta povećava broj slabih mesta, i povećava verovatnoća pojave još slabijih mesta u izolacionom sistemu. Pojava je definisana kao zakon porasta verovatnoće proboja. Kasnije se tragalo za iznalaženjem matematičkih funkcija koje izražavaju uočenu zakonitost.

Izvođenje zakona polazi od određenih pretpostavki kako bi se realizovao određeni tip analize. Osnovna pretpostavka je da se svaki pojedinačni (zamišljeni ili realni) deo n -puta uvećani uzorak oznake P_n ponaša isto kao i osnovni (početni) uzorak oznake P_1 , pod istim uslovima. Oznaka P može se odnositi na verovatnoću ishoda posmatrane veličine. Zakon porasta se izvodi generalizovano tako da se može primeniti kako kod jednosmernog, tako i kod naizmeničnog, impulsnog odnosno proizvoljnog naponskog naprezanja. Oblik naponske promene mora biti identičan za osnovni i n puta uvećani uzorak odnosno realni objekat.

7.1 Izvođenje zakona porasta za slučaj uvećanja površine

Najčešća primena zakona porasta je utvrđivanje funkcije raspodele probojnog napona za slučaj uvećanja površine objekta u odnosu na uzorak (povećanje dužine kabla i dr). Takođe se odnosi i na uvećanje broja elemenata (povećanje broja štapova u statoru, broja izolatora i dr). Izvođenje zakona porasta je ilustrovano na Sl. 7.1. Polazi se od uzorka P_1 i n -tostruko uvećanog uzorka P_n koji se sastoji iz n jednakih paralelno povezanih elemenata koji su jednaki sa P_1 . Ako se traži da je probojni napon U_n n -tostruko uvećanog uzorka P_n veći od primenjenog napona U to znači da za svaki uzorak P_n ($n=1,2,\dots$) probojni naponi $U_1, U_2, \dots, U_n$ respektivno mora biti veći od U tj. važi: [65]

$$W(U_n > U) = W(U_1 > U, U_2 > U, \dots, U_n > U) \quad (7.1)$$

gde je $W(\dots)$ verovatnoća takva da nastupe u zagradi naznačeni uslovi.

Ako se pretpostavi da je dielektrična čvrstoća svakog uzorka P_n ($n=1,2,\dots$) nezavisna od toga da li se on nalazi sam ili sa ostalim uzorcima, onda je moguće probojne napone uzoraka posmatrati kao nezavisne statističke veličine čime izraz (1) prelazi u:

$$W(U_n > U) = W(U_1 > U) \cdot W(U_2 > U) \cdot \dots \cdot W(U_n > U) \quad (7.2)$$

Ako se označi funkcija raspodele probojnog napona uzorka P_1 sa $F(1,U)$ a uzorka P_i sa $F(i,U)$, tada se može za funkcije raspodele verovatnoća da ne dođe do proboja uzoraka pisati:

$$W(U_1 > U) = 1 - F(1, U) \quad (7.3)$$

$$W(U_n > U) = 1 - F(n, U) \quad (7.4)$$

Pošto je svaki uzorak P_i ($i=1,2,\dots$) jednak uzorku P_1 dobija se:

$$W(U_1 > U) = W(U_2 > U) = \dots = W(U_n > U) = 1 - F(1, U) \quad (7.5)$$

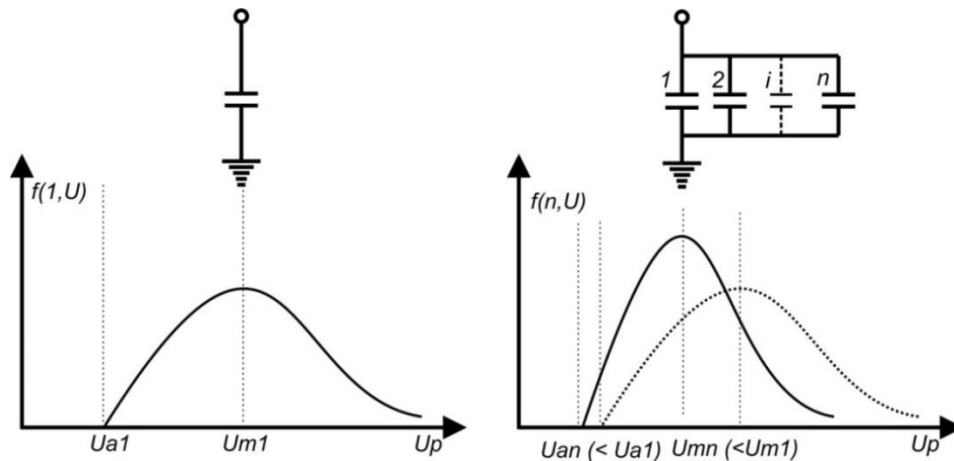
Kada se u izrazu (2) zamene izrazi (3) i (4) dobije se zakon porasta: [65]

$$F(n, U) = 1 - [1 - F(1, U)]^n \quad (7.6)$$

Funkcija raspodele raste sa povećanjem n prema izrazu (6). Diferenciranjem ovog izraza dobija se izraz za funkciju gustine:

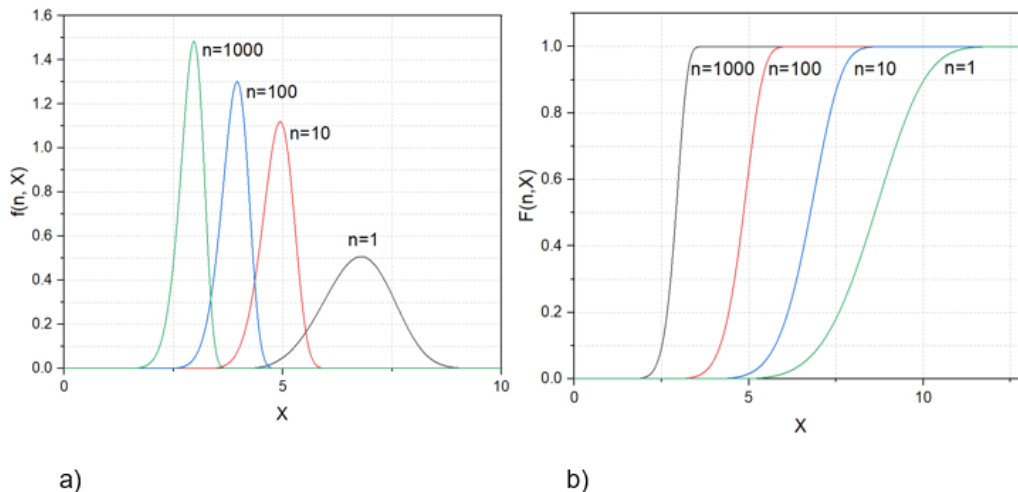
$$f(n, U) = n f(1, U) \cdot [1 - F(1, U)]^{n-1} \quad (7.7)$$

Zakovitosti izražene u izrazima (6) i (7) su upotrebljive za proizvoljne raspodele. Sa poznavanjem funkcije raspodele jednog uzorka moguće je preračunati raspodele n -tostruko uvećanog uzorka.



Sl. 7.1 Osnovni uzorak P_1 i n puta uvećani uzorak P_n .

Na Sl. 7.2 prikazani su dijagrami prema jednačinama (6) i (7), kao ilustracija zakona porasta. Pokazuje se da je od posebnog značaja analiza funkcija raspodele za male vrednosti (označeno elipsom) i za velike vrednosti (označeno praougaonikom), odnosno njihova kombinacija.



Sl. 7.2 a) Funkcija gustine $f(n, x)$; b) funkcija raspodele $F(n, x)$ za n - puta uvećan uzorak.

7.2 Analiza funkcije porasta

Ako se posmatra slučaj za veliki faktor povećanja n pokazaće se da funkcija raspodele $F(n, U)$ zavisi samo od početnog toka funkcije raspodele $F(1, U)$. Za egzaktno eksperimentalno određivanje te oblasti funkcije $F(1, U)$ potrebno je izvršiti jako puno merenja na uzorku P_1 . Tako je potrebno za proračun funkcije raspodele pri jednom 1000-strukom povećanju uzorka P_1 odrediti vrednost funkcije raspodele uzorka P_1 koje leže oko vrednosti 0,001. Da bi se funkcija raspodele $F(1, U)$ oko tačke 0,001 eksperimentalno odredila potrebno je izvršiti najmanje 1000 eksperimenata na uzorku P_1 . Zbog toga se dolazi skoro na isto: ili se izvrši veći broj eksperimenata na modelima da bi se zaključile vrednosti i ponašanje probojnog napona prototipa, ili se pak izvrši nekoliko merenja vrednosti na samom prototipu. Ova poteškoća se može prevladati pod uslovom da je funkcija raspodele $F(1, U)$ uzorka P_1 na neki način poznata. U tom slučaju potrebno je samo odrediti parametre raspodele (najčešće srednju vrednost i standardno odstupanje) iz manjeg broja eksperimenata, čime funkcija $F(1, U)$ postaje poznata na svojoj čitavoj oblasti definisanosti. [65]

Zanimljiva je analiza slučaja za visoku verovatnoću proboja $F(n, U)$, odnosno za veliki faktor naponskog opterećenja. Tada se verovatnoća $F(n, U)$ može aproksimirati sa izrazom $(1-\varepsilon)$ pri čemu je ε jedan proizvoljno mali broj. Prema izrazu (6) tada se za raspodelu $F(1, U)$ dobija:

$$F(1, U) \leq 1 - \varepsilon^{\frac{1}{n}} \quad (7.8)$$

Na primer, za zadato ε od 1% odnosno 0.01 i faktor povećanja $n = 20$ desni član relacije (8) postaje znatno manji od jedan, odnosno $F(1, U) \leq 0,21$. Znači za slučaj velikog uvećanja i velikog opterećenja, uz zanemarivanja članova višeg reda u razvoju funkcije $e^{-F(1, U)}$, može se pisati:

$$e^{-F(1, U)} \approx 1 - F(1, U) \quad (7.9)$$

Time zakon porasta, prema jednačini (6) prelazi u

$$F(n, U) \approx 1 - e^{-n \cdot F(1, U)} \quad (7.10)$$

$$f(n, U) \approx nF(1, U) \cdot e^{-(n-1) \cdot F(1, U)} \quad (7.11)$$

Ovi odnosi važe za $n > 20$ sa jednom praktično zadovoljavajućom tačnošću.

U slučaju za nisku verovatnoću proboja $F(n, U) \leq 0,1$, verovatnoća modela je znatno manja, $F(1, U) \ll 0,1$. U tim slučajevima se može zakon porasta jako pojednostaviti. Ako se jednačina (6) podeli sa $F(1, U)$ i potraži granična vrednost kada $F(1, U) \rightarrow 0$, dobije se:

$$\frac{F(n, U)}{F(1, U)} \approx \lim_{F(1, U) \rightarrow 0} \frac{F(n, U)}{F(1, U)} = n \quad (7.12)$$

Na osnovu ovoga se zaključuje da male vrednosti verovatnoće proboja rastu proporcionalno sa faktorom povećanja. Ova tvrdnja ima vrlo važne posledice za ispitivanje visokonaponskih uređaja.

7.3 Primena Weibulove raspodele na zakon porasta

Weibulova raspodela je praktično najznačajnija za praktičnu primenu u slučajevima analize rezultata probоя. Značajno je razmotriti kako se ona primenjuje za slučaj zakona porasta, ako se uzme da je proboj osnovnog uzorka kao i uvećanog opisan odgovarajućim Weibulovim raspodelama. Od posebnog značaja je analiza zavisnosti parametara raspodele od povećanja, kao i srednje vrednosti napona i standardnog odstupanja. [1] [65]

Funkcija gustine verovatnoće raspodele i funkcija verovatnoće za Weibulovu raspodelu je:

$$f(U) = f(U, U_a, \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^\beta} \quad (7.13)$$

$$F(U) = F(U, U_a, \eta, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^\beta} \quad (7.14)$$

pri čemu je parametar U_a parametar raspodele u smislu minimalnog probojnog napona, praga, $U > U_a$. Parametar β je parameter oblika, forme, utiče na simetričnost raspodele, a parametra η je parameter skaliranja (normiranja) napona a dodatno značenje se dobija kada se nađe vrednost funkcije raspodele za napon U koji proističe iz jednakosti $\eta = U - U_a$. Ako se za osnovni uzorak pretpostavi raspodela $F(1, U)$, na osnovu jednačine (17) i izraza (6), dobija se: [65]

$$F(n, U) = 1 - \left[e^{-\left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^\beta} \right]^n = 1 - e^{-n \left(\frac{U - U_a}{\eta} \right)^\beta} = 1 - e^{-\left(\frac{U - U_a}{\eta / n^{1/\beta}} \right)^\beta} \quad (7.15)$$

Imenilac eksponenta u (7.15) može se preformulisati u

$$\eta_n = \eta / n^{1/\beta} \quad (7.16)$$

tako da se za funkciju raspodele $F(n, U)$ dobije izraz:

$$F(n, U) = 1 - e^{-\left(\frac{U - U_a}{\eta_n} \right)^\beta} \quad (7.17)$$

Kao što se vidi, pri povećanju uzorka ne menja se forma funkcije raspodele probojnog napona. To ne važi za neku proizvoljnu funkciju raspodele. Ako se koristi Gausova raspodela za opisivanje probojnog napona početnog uzorka $F(1, U)$, raspodela n puta uvećanog uzorka nije više Gausova.

7.3.1 Standardno odstupanje i srednja vrednost probojnog napona pri povećanju uzorka za Vejbulovu raspodelu

Standardna odstupanje odnosno devijacija jednog n puta uvećanog uzorka σ_n izračunava se iz funkcije raspodele (7.13): [65]

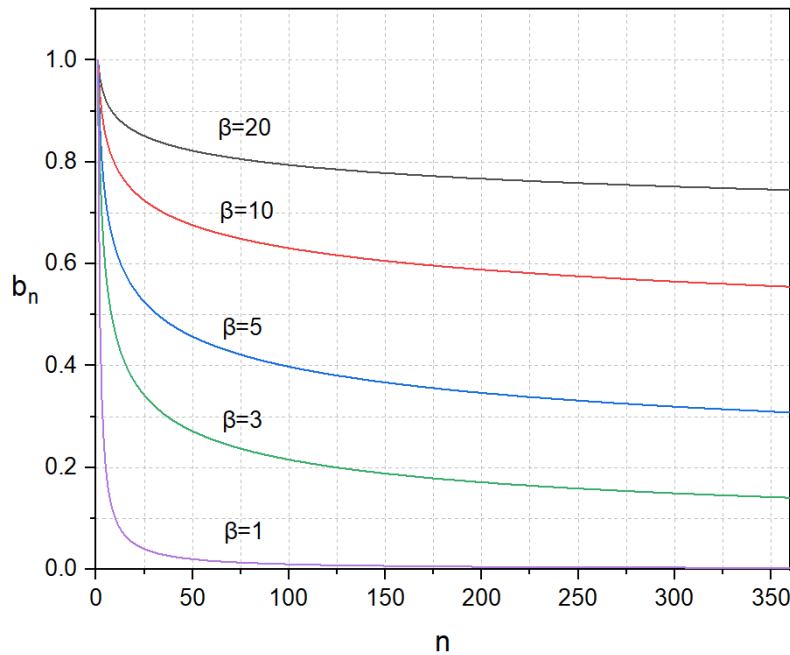
$$\sigma_n = \frac{\eta_n}{K(\beta)} \quad (7.18)$$

$$K(\beta) = \left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.19)$$

gde je $\Gamma(\beta)$ gama funkcija argumenta β . Smenom η_n za standardno odstupanje σ_n uvećanog uzorka, uz poznavanje standardne devijacije σ_1 osnovnog uzorka, dobija se:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1}{n^{\frac{1}{\beta}}} = b_n \sigma_1; \quad b_n = \frac{1}{n^{\frac{1}{\beta}}} \quad (7.20)$$

Odavde se vidi da standardno odstupanje probojnog napona opada sa povećanjem n ali sa β -tim korenom. Faktor redukcije b_n je predstavljen na Sl. 7.3 za razne vrednosti β u zavisnosti od faktora uvećanja n .



Sl. 7.3 Faktor redukcije b_n , za razne vrednosti β u zavisnosti od faktora uvećanja n .

Srednja vrednost probojnog napona $\bar{U}_n$ se dobija iz raspodele n -puta uvećanog uzorka (7.16) kao:

$$\bar{U}_n = U_a + \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot \eta_n \quad (7.21)$$

Uz korišćenje izraza (7.18) sledi:

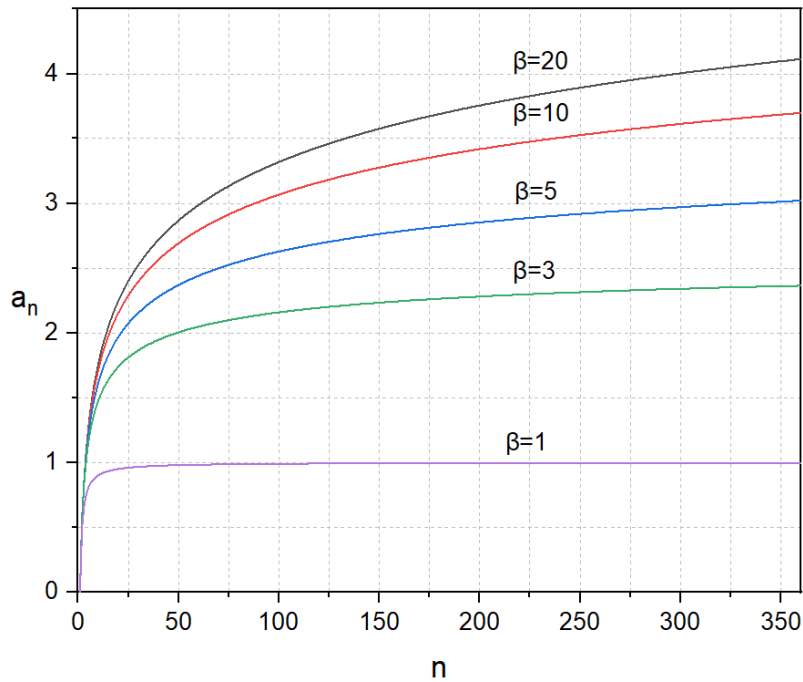
$$\eta_n(n) = K(\beta) \cdot \frac{\sigma_1}{n^{\frac{1}{\beta}}} \quad (7.22)$$

$$\bar{U}_n = U_a + K(\beta) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot \frac{\sigma_1}{n^{\frac{1}{\beta}}} = U_a + L(\beta) \cdot \frac{\sigma_1}{n^{\frac{1}{\beta}}} \quad (7.23)$$

$$L(\beta) = K(\beta) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (7.24)$$

Srednja vrednost probojnog napona opada na isti način kao i standardna devijacija, hiperbolički sa β -tim korenom povećanja n i dostiže asimptotski vrednost praga U_a (minimalna vrednost probojnog napona). Eliminacijom praga U_a iz jednačine (7.23) dobija se međusobna zavisnost $\bar{U}_n$ srednje vrednosti probojnog napona i σ_1 standardnog odstupanja osnovnog uzorka kao:

$$\bar{U}_n = \bar{U}_1 - \sigma_1 \cdot a_n(n); a_n(n) = L(\beta) \cdot \left(1 - \frac{1}{n^{\frac{1}{\beta}}}\right) \quad (7.25)$$



Sl. 7.4 Faktor redukcije a_n za razne vrednosti β u zavisnosti od faktora uvećanja n .

Ako se u izrazu (7.25) primeni normiranje napona $\bar{U}_n$ naponom $\bar{U}_1$ osnovnog uzorka, dobija se relacija:

$$\frac{\bar{U}_n}{\bar{U}_1} = 1 - \frac{\sigma_1}{\bar{U}_1} \cdot a_n(n) \quad (7.26)$$

Prema jednačinama (7.25) i (7.26) se vidi da je, sa povećanjem uzorka, smanjenje srednje vrednosti probojnog napona $\bar{U}_n$ linearno zavisno od standardnog odstupanja σ_1 . To ima

za posledicu da kod probojnih napona bez rasipanja, povećanje površine elektroda nema nikakav uticaj na dielektričnu čvrstoću sistema, odnosno primena zakona porasta nije potrebna. Takav slučaj se dešava kada je proboj determinisan (nije stohastičan) kao kod varistora, odvodnika prenapona, poliranih elektroda i slično.

Zakon porasta verovatnoće se jednako uspešno može primenjivati i kod određivanja ishoda drugih stohastičkih veličina kao što su naponski prag pojave parcijalnih pražnjenja, vremena do proboja pri izabranom naponu i drugo.

7.4. Koeficijent varijacije pri povećanju uzorka za različite raspodele

Koeficijent varijacije, oznaka CV, je odnos standardne devijacije i aritmetičke sredine za dati uzorak. Ukoliko su poznati parametri populacije, s se može zameniti sa σ , a $\bar{U}$ sa μ :

$$CV = \frac{s}{\bar{U}}; CV = \frac{\sigma}{\mu}.$$

Preko koeficijenta varijacije CV moguće je porediti relativno rasipanje iz dva različita uzorka, u kojima su korišćene različite jedinice mere ili imaju različite aritmetičke sredine. Iz formule se vidi da je relativno rasipanje određene varijable veći što je veća vrednost standardne devijacije za istu srednju vrednost varijable. Kao ni standardna devijacija i varijansa, ni koeficijent varijacije nema jedinicu mere varijable. Ponekad se vrednost koeficijenta varijacije pomnoži sa 100, da bi se varijabilitet izrazio u procentima.

Zavisnost koeficijenta varijacije od faktora uvećanja $\left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_1 \rightarrow \left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_n$ se može izračunati za različite raspodele od interesa. [1]

- Normalna raspodela:

$$\left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_n = \left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_1 \cdot \frac{k_{1n}}{1 - \left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_1 k_{2n}}$$

gde su korišćeni izrazi $k_{1n} = \frac{1}{2}(\lambda^n \sqrt[3]{0,84} - \lambda^n \sqrt[3]{0,16})$, $k_{2n} = \frac{1}{2}(\lambda^n \sqrt[3]{0,84} + \lambda^n \sqrt[3]{0,16})$ pri čemu su $\lambda^n \sqrt[3]{0,84}$ i $\lambda^n \sqrt[3]{0,16}$ kvantili reda $\lambda^n \sqrt[3]{0,84}$ i $\lambda^n \sqrt[3]{0,16}$ od $N(0;1)$.

- Vejbulova troparametarska raspodela:

$$\left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_n = \left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_1 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{U_a}{\bar{U}}\right)_1 (\beta \sqrt[n]{n} - 1)}$$

gde su U_a i β parametri Vejbulove raspodele.

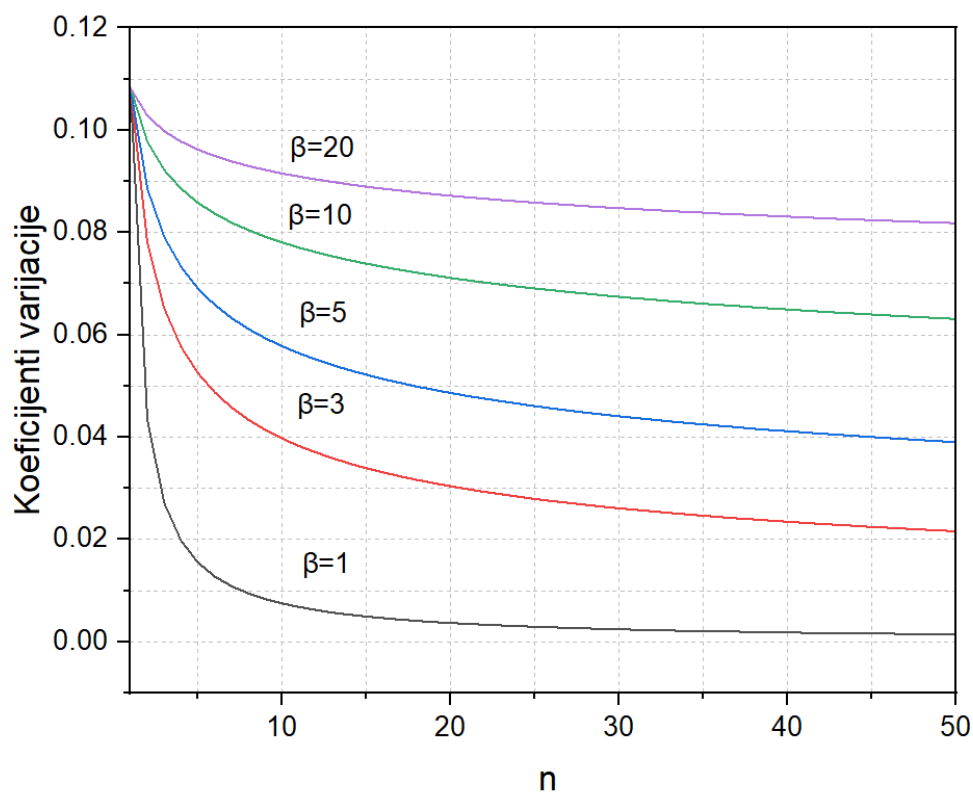
- Vejbulova dvoparametarska raspodela:

$$\left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_n = \left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_1$$

- Eksponecijalna dvoparametarska raspodela:

$$\left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_n = \left(\frac{s}{\bar{U}}\right)_1 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{U_a}{\bar{U}}\right)_1 (n-1)}.$$

Navedene relacije za koeficijent varijacije u zavisnosti od faktora uvećanja n za različite parametre oblika Vejbulove raspodele date su na Sl. 7.5.



Sl. 7.5 Koeficijenti varijacije u zavisnosti od faktora uvećanja n .

8. ŽIVOTNI VEK VN IZOLACIONIH SISTEMA

Tokom vremena dolazi do promena u elektroizolacionom sistemu (EIS). Neke promene u materijalima, pogotovu organskim, se dešavaju samim protokom vremena ali nisu nužno procesi starenja. Neka normalna opterećenja EIS tokom eksploatacije doprinose bržim promenama. Ovi procesi promena se podvode pod procese starenja elektroizolacionog sistema. Neki jako visoki nivoi opterećenja, kao što su napon ili temperature, podvode se pod procese ubrzanog starenja.

U literaturi [7] su sistematizovana dosadašnja saznanja i iskustva o procesima starenja EIS, o imanentnim osobinama koje doprinose starenju, o uzrocima i posledicama starenja.

U standard se polazi od datosti, imanentnih osobenosti tehnike i tehnologije, materijala i rešenja u sistemima izolacije. Zatim se razmatraju različite kategorije naprezanja odnosno starenja EIS i različiti procesi starenja u tim kategorijama. Kategorije i procesi su uslovno razdvojeni ali se razmatra i povezanost u sinergističkom delovanju. Kada starenjem dominira jedan faktor koji se može pojavljivati u više kategorija, to se naziva jednofaktorsko starenje. Višefaktorsko starenje nastaje kada više od jednog faktora iste ili različitih kategorija starenja značajno utiču na procese starenja EIS. Faktori starenja mogu delovati sinergistički, odnosno mogu postojati direktne interakcije između naprezanja. Interakcije odnosno sinergije mogu biti pozitivne, znatno češće, ili negativne. U svakom slučaju starenje realnog EIS je vrlo složen proces, čak i ako postoji samo jedan dominantni faktor starenja, kvar uvek nastupa iz više razloga.

Mogu se postaviti osnovne kategorije naprezanja koja su ujedno i osnovne kategorije starenja, međusobno vezane uzročno posledično: [7] [13]

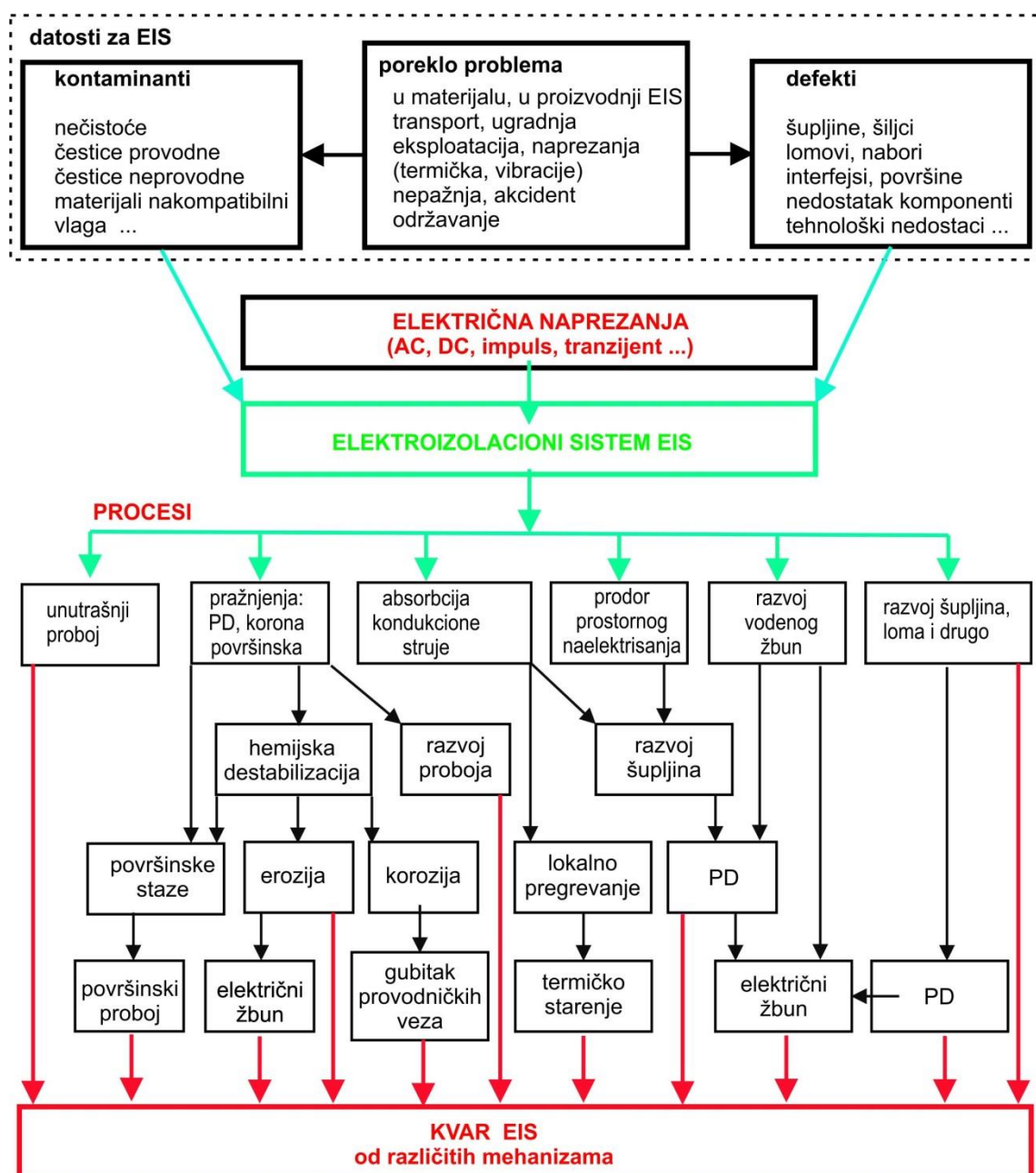
- električna,
- termička,
- mehanička i
- naprezanja zbog radne sredine.

Treba naglasiti da je starenje realnog objekta uvek kombinovano, ako se posmatra u dužem vremenskom periodu.

8.1. Električno starenje

Električno starenje se uslovno odnosi na procese koji su u relaciji sa električnim poljem odnosno električnim naprezanjima i električnim procesima, direktno ili indirektno. Posmatra se nekoliko tipova električnog naprezanja izolacionog sistema: *DC*, *AC*, *impulsno*, *tranzijenti*. Na Sl. 8.1 prikazani su procesi električnog starenja elektroizolacionog sistema sa svojim uzročno posledičnim povezanostima. [7] Šema upućuje na vremenski tok razvoja kvara EIS koji se najčešće karakteriše kao proboj. Međutim, procesi mogu da teku paralelno, da se smenjuju ili ponavljaju, tako da je šema samo uslovna. Sa druge strane šema ukazuje na moguće metode ispitivanja EIS kao i kriterijume i parametre dijagnostike

stanja. Takođe ukazuje na laboratorijske metode ubrzanog starenja i istraživanja pojedinih uticaja, istraživanja sinergije delovanja u kontrolisanim uslovima, unapređenje tehnologija, tehnika i dizajna EIS.



Sl. 8.1 Procesii električnog starenja elektroizolacionog sistema [7]

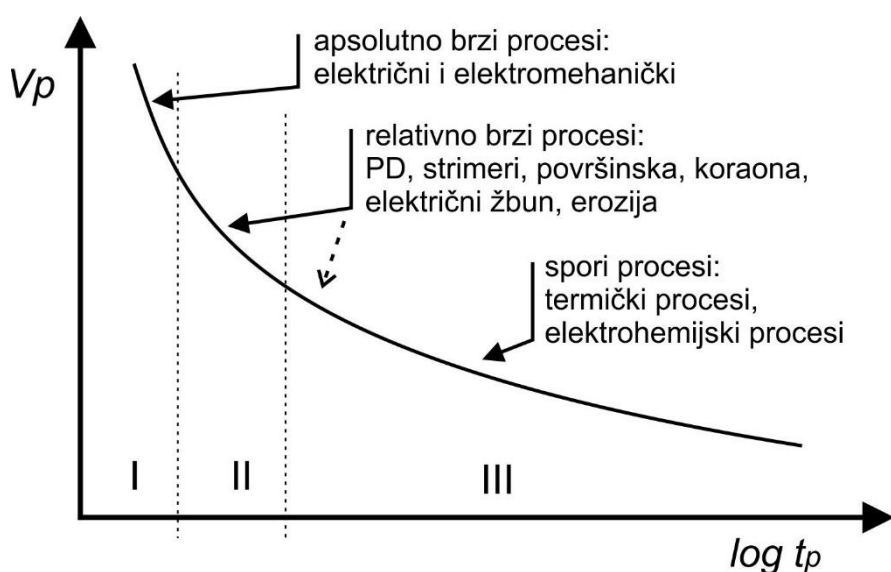
Prema Sl. 8.1 se može uočiti prvi red polja koji ukazuje na datosti EIS, one koje su ugrađene kao defekti ili kao kontaminanti odnosno ukazuje na njihovo poreklo. Poreklo nesavršenosti izolacionih sistema potiče kako od samih materijala tako i od proizvodnje EIS, eksploatacije, akcidenata, održavanja. Slaba mesta u EIS su pre svega ugrađeni ili naknadno razvijeni diskontinuiteti unutar EIS koji nužno dovode do lokalnog pojačanja polja i električnih procesa starenja (defekti, Sl. 8.1). Sa druge strane se izdvajaju

kontaminanti koji takođe predstavljaju diskontinuitet i mesta razvoja lokalnih električnih procesa (kontaminanti, Sl. 8.1).

U prvom redu polja „procesi“, Sl. 8.1, su navedeni osnovni električni procesi starenja, ne nužno samo električni. Oni se mogu razlikovati po vremenu podnošenja opterećenja do sloma EIS, odnosno proboja. U prvom redu su vrlo brzi (pred) probojni procesi, kvantnomehanički elektronski procesi jakih električnih polja u volumenu dielektrika i ekstremnih elektrostatičkih sila i elektromehaničkih procesa koji dovode do brzog unutrašnjeg proboja, kao što je naznačeno na Sl. 8.1 i Sl. 8.2. Ovi brzi procesi ne mogu biti mera životnog veka EIS jer se mere sekundama a životni vek decenijama. Međutim, mogu biti bitan faktor kod uračunavanja uticaja kratkih impulsnih opterećenja EIS koja u konačnom integralu značajno određuju životni vek.

Za apsolutno brze procese starenja vreme do proboja t_p , za primenjeni relativno visok napon V_p , dati deo krive u zoni I, (Sl. 8.2) može se aproksimirati izrazom: [7]

$$V_p \cdot \log t_p = \text{const} \quad (8.1)$$



Sl. 8.2 Vreme života EIS i tipovi procesa starenja. Zavisnost probojnog napona V_p od vremena trajanja opterećenja t_p .

Prema Sl. 8.1 i Sl. 8.2 (zona II) prikazani su nešto dugotrajniji procesi starenja kao što su razna pražnjenja (parcijalna pražnjenja, korona, površinska pražnjenja, strimeri...) koji za posledicu imaju stvaranje puznih staza, elektrohemijskih procesa i destabilizacije EIS, provodnih žbunastih kanala, provodnih šiljaka i konačno proboja po više scenarija. Ovi procesi su relativno brzi u odnosu na životni vek ali svojim posledicama (erozijom, korozijom, puznim stazama) doprinose starenju (Sl. 8.2). Za ove relativno brze procese se može primeniti, uz veće aproksimacije, relacija kao za apsolutno brze procese.

Za EIS višedecenijskog trajanja dominantni procesi starenja traju dugo, razvoj posledica je vrlo spor (zona III, Sl. 8.2). Tu spadaju elektrotermički i elektrohemijski procesi koji degradiraju karakteristike EIS. To su procesi koji dovode do lokalnog pregrevanja

električnom energijom preko dielektričnih gubitaka (apsorbicija, kondukcione struje) i generalno termičke degradacije EIS do stepena proboja (Sl. 8.1). Sastavni deo termičkog starenja su elektrohemijski procesi pospešeni temperaturom, zatim elektroliza, erozija i drugi. Dugoročno gledano, od velikog značaja su nesavršenosti EIS i razvoj defekata koji uz podršku pražnjenja i električnih procesa starenja dovode do proboja. Deo krive zavisnosti vremena do proboja t_p od primenjenog napona V_p na dati EIS, sa dominantnim učešćem dugotrajnih procesa starenja (Sl. 8.2), se može aproksimirati izrazom: [7] [23]

$$V_p^r \cdot t_p = const \quad (8.2)$$

gde eksponent starenja r zavisi od dizajna EIS, upotrebljnih dielektričnih materijala i kombinacija, temperature, statusa okruženja, mehaničkih naprezanja i niza drugih veličina.

8.2. Termičko starenje

Termička naprezanja se odnose na fizičke, hemijske i mehaničke procese starenja pospešene povišenom temperaturom. Fizičke promene usled temperature su uočljive se odnose na osobina kao što su gustina, provodnost, elastičnost, žilavost, boja i niz drugih. Hemijske promene usled temperature se odnose na promene starenja usled hemijskih reakcija, na polimerizaciju, depolimerizaciju, difuziju i druge. Mehaničke promene usled temperature su posledica sila nejednake termičke dilatacije (širenja i/ili skupljanja) metalnih delova i izolacionih materijala, što dovodi do pucanja veza, pucanja materijala i dr.

Povećanje brzine fizičkih i hemijskih procesa u odnosu na normalne ambijentalne brzine, koji se odvijaju u stanju termodinamičke ravnoteže (dugotrajni procesi), glavni su uzroci termičkog starenja. Mnogi uobičajeni procesi starenja (Njutnovski procesi prvog reda), u rasponu temperatura eksploatacije EIS, prate Arrheniusovu jednačinu: [7] [22]

$$t_p = A e^{-\frac{E}{kT}} \quad (8.3)$$

gde su: t_p – životni vek EIS, A – konstanta, E – aktivaciona energija, k – Boltzmanova konstanta, T – apsolutna temperatura. Formula je zanimljiva jer uključuje aktivacione energije E pojedinih procesa, tako da je funkcija kompleksnog EIS u opštem slučaju skokovita. Za složene EIS, gde se koristi više materijala sa različitim E za različite procese, formula dobija složenu strukturu.

Za takve EIS potrebna su laboratorijska ispitivanja, odnosom potvrda kvaliteta. To su dugotrajna ispitivanja, godišnjeg i višegodišnjeg trajanja, na povišenim temperaturama i povišenim naponima. Procena životnog veka se vrši na osnovu najmanje tri temperature ubrzanog starenja preporučених u standardima za dati EIS. Najniža temperatura ubrzanog starenja T_{min} se bira tako tako da se postigne kriterijum kvara nakon vremena višeg od 5% od projektovanog veka trajanja, ili najmanje 5000 h (više od 200 dana).

Sljedeće dve više temperature se biraju po kriterijumu $(T_{min} + 20)K$ i $(T_{min} + 40)K$, prema IEC 60505.

8.3. Mehaničko starenje

Mehanička naprezanja se odnose na dominantno mehaničke procese starenja koja uključuju: [7] [22]

- mehanički zamor materijala uzrokovan dugotrajnim cikličnim mehaničkim naprezanjima niskog nivoa,
- termo mehanički zamor materijala uzrokovan dugotrajnim cikličnim dilatacijama niskog nivoa,
- pucanje izolacije uzrokovano visokim nivoom mehaničkog naprezanja prolaznog karaktera koji može biti uzrokovan spoljnim silama ili neadekvatnim uslovima rada opreme,
- abrazivno habanje uzrokovano relativnim kretanjem između komponenti opreme i drugi.

Kao i svi procesi starenja EIS, i mehanički procesi mogu biti lokalizovani i dovesti do slabog mseta koje postaje uzrok kvara. U praksi, u mnogim EIS, procesi mehaničkog starenja koji dovode do kvara su složeni, brojni i međuzavisni. Životni vek t_p nekog EIS uzrokovan dominantnim učešćem dugotrajnih mehaničkog procesa intenziteta M se aproksimativno može procenjivati preko formule: [7]

$$t_p = A M^{-m} \quad (8.4)$$

gde su: t_p – životni vek EIS, A – konstanta, M - nivo mehaničkog naprezanja, m - eksponent starenja.

8.4. Starenje zbog okruženja

Naprezanja iz neposrednog okruženja se odnose na starenje EIS tokom rada su: [7]

- vlaga (kontaminacija, reakcije),
- kiseonik (oksidacija, hemijske reakcije),
- hemikalije (hemijske reakcije, destabilizacija sistema),
- biološki agensi (destabilizacija sistema,
- vremenske prilike (u slučaju izloženosti delovanju),
- zagađivači (organski, neorganski, provodni, neprovodni),
- zračenja (u slučaju izloženosti, destabilizacija sistema), i drugi.

Različiti su i neuporedivi mehanizmi starenja zbog okruženja tako da ne postoje opšti modeli. Stoga se za svaki pojedinačni uticaj, poznat ili nepoznat, formira model i procenjuje doprinos starenju EIS.

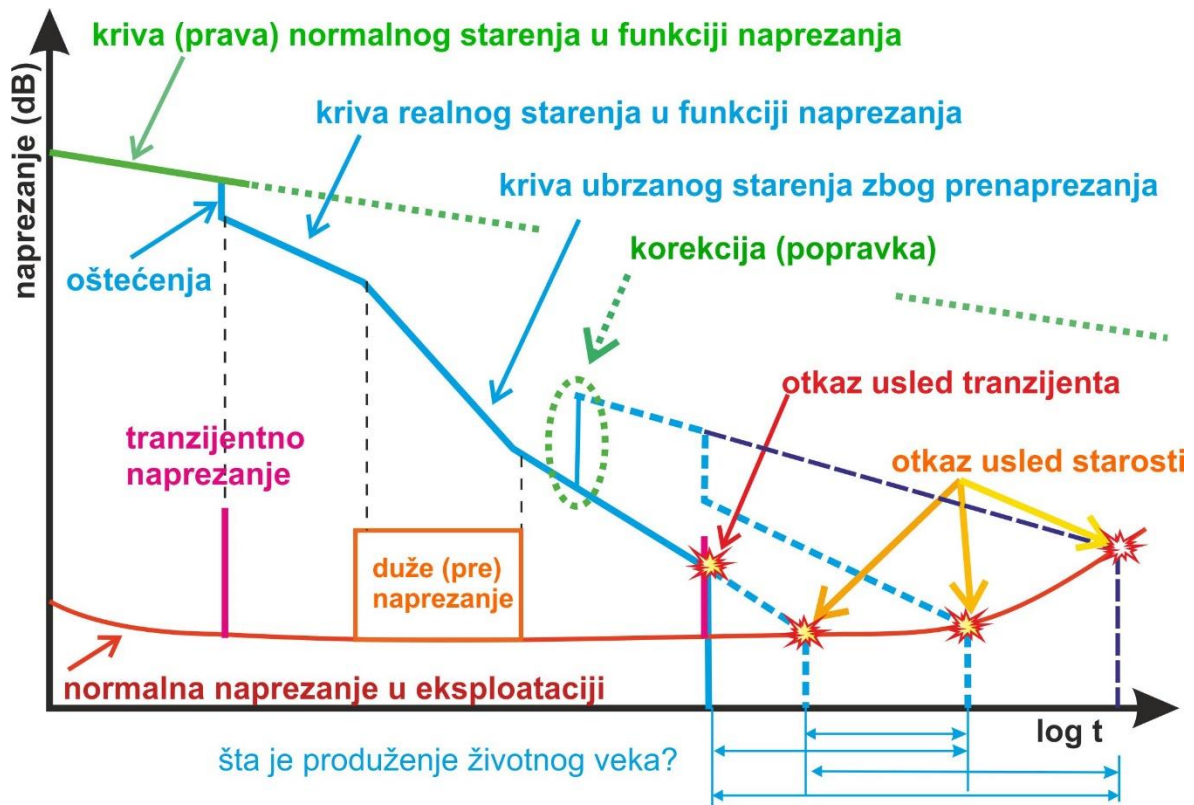
8.5. Kombinovani procesi starenja izolacionog sistema

Kao što je navedeno, dominantne kategorije starenja su električna, termička, mehanička i naprezanja zbog radne sredine. Takođe je istaknuto da je starenje realnog objekta uvek kombinovano pri čemu naprezanja treba posmatrati u vremenu, dinamički. Svako od naprezanja može da bude funkcija vremena, da deluju na nižem nivou ali u dužem periodu, ili da deluju u kraćem periodu intenzivnije, ili pak da deluju impulsno, sa kratkotrajnim opterećenjima visokog intenziteta. Na Sl. 8.3 dat je prikaz dinamike različitih opterećenja i krive starenja nekog elektroizolacionog sistema. [7] [66]

Kao prvo, data je kriva „standardnog naprezanja u eksploataciji” koja može a ne mora da korespondira sa krivom intenziteta otkaza u elektrotehnici. U početku radnog veka mašine mogu postojati povećana opterećenja zbog konstrukcionih razloga koji kasnije nestaju i prelaze u unoformna projektovana opterećenja. Na kraju radnog veka mašina gubi projektovane karakteristike, u manjoj ili većoj meri, i opterećenja ponovo rastu. Kriva (prava) normalnog starenja u funkciji naprezanja ukazuje da se mašine izvode sa velikom robusnošću i otpornošću na prolazna opterećenja (isprekidana linija, Sl. 8.3). U praksi je životni vek mašine znatno kraći u odnosu na teorijski koji bi proistekao iz projektovanih osobina. Naime, ne retko se pojavljuju tranzijenta opterećenja kratkog trajanja (manje od sekunde) i visokih magnitude koji dovode do oštećenja izolacionog sistema i lome krivu starenja. Ovo se najčešće odnosi na električne brze tranzijente, ređe na mehaničke udare. Duža prenaprezanja izolacionog sistema su svojstvena pregrevanjima sistema usled nekog kvara na sistemu hlađenja, neadekvatno okruženje, kontaminacija, dok su električna prenaprezanja ovog tipa moguća kada je izolacioni sistem pregrejan, oštećen ili neadekvatan. Ova naprezanja, samostalno ili u sinergiji, dovode do ubrzanog kontinuiranog starenja izolacionog sistema, Sl. 8.3. To može značajno da skрати preostali životni vek mašine pa se preduzimaju korektivne mere odnosno popravka sistema.

Međutim, kakva god korekcija bila, nije moguće vratiti sistem na krivu projektovanog starenja. U poslednjoj deonici životnog veka mašina je mnogo manje otporna na tranzijentna brza opterećenja, na pregrevanja i drugo jer ima znatno manje reserve, Sl. 8.3. Trenutak otkaza mašine je teško proceniti matematički odnosno statistički. Tu se pre svega koriste empirijski modeli koji uzimaju u obzir uslove rada mašine, iskustva sa drugim sličnim mašinama i drugo.

Istraživanja treba da pomognu pri odlučivanju o merama korektivnog održavanja za produženje životnog veka. Pri tome treba da se ima u vidu sva kompleksnost stanja sistema, stanja okruženja, uslova rada i niza stohastičkih pojava (Sl. 8.3). Često nije moguće napraviti dobru procenu operacija za produženje životnog veka. U slučajevima vitalnih elektroenergetskih objekata, pribegava se zameni kompletnog elektroizolacionog sistema.



Sl. 8.3 Prikaz dinamike opterećenja i krive starenja nekog elektroizolacionog sistema

8.6. Metode procena preostalog životnog EIS

Karakteristika životnog veka ili preostalog životnog veka EIS je određena verovatnoćom proboja izolacionog sistema na određenom primenjenom naponu U_p tokom vremena do proboja t_p :

$$U_p = f(t_p) \quad (8.5)$$

Kao što je rečeno, u praksi se koristi više formula, u zavisnosti od dominantnih procesa starenja. Za starenje statorskog EIS odgovorni su procesi dugog trajanja, pa se iz formule (8.2) dobija:

$$U_p \cdot t_p^{\frac{1}{r}} = C \quad / \log \quad (8.6)$$

$$\log U_p = -\frac{1}{r} \cdot \log t_p + \log C \quad (8.7)$$

gde je C konstanta koja zavisi od izolacionog materijala (debljina izolacije) i elektrodne konfiguracije, r je koeficijent preostalog životnog veka koji određuje nagib karakteristike „probojni napon-vreme” i zavisi od materijala izolacije. [7] [10] Jasno je da su veličine U_p i t_p stohastičke prirode i da procena životnog veka EIS zahteva alate statističke analize.

Empirijska funkcija raspodele vremena do proboja t_p (Sl. 8.4a), može da se izrazi pomoću Weibulove raspodele kao:

$$F(t_p; U_{p1}) = 1 - e^{-\left(\frac{t_p}{t_{p63}(u_{p1})}\right)^{\beta_t}} \quad (8.8)$$

gde je U_{p1} primenjeni konstantan napon kao parametar.

Karakteristika životnog veka predstavlja zavisnost konstantnog probojnog napona od vremena i formira pravu na duploeksponencijalnoj skali, Sl. 8.4b).

Analogno tome, empirijska funkcija napona proboja za fiksirani parametar t_{p1} vreme do proboja (Sl. 8.4c) je data kao:

$$F(U_p; t_{p1}) = 1 - e^{-\left(\frac{U_p}{U_{p63}(t_{p1})}\right)^{\beta_u}} \quad (8.9)$$

Iz uslova jednakosti raspodela sledi:

$$F(t_p; U_{p1}) = F(U_p; t_{p1}) \quad (8.10)$$

Nakon određenih operacija uprošćavanja dobija se:

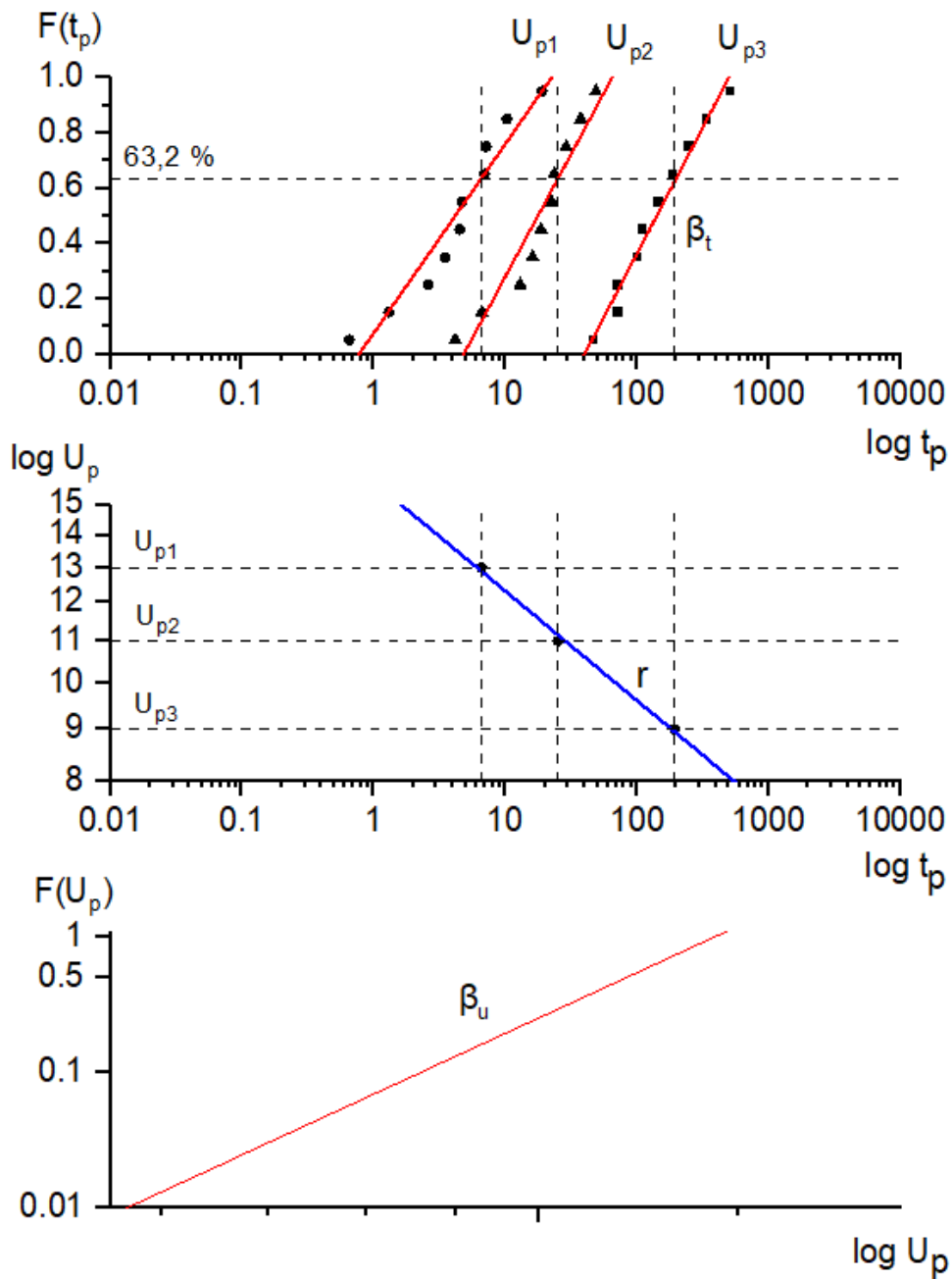
$$u_{p63}(t_{p1})[t_{p1}]^{\frac{\beta_t}{\beta_u}} = u_{p1}[t_{p63}(u_{p1})]^{\frac{\beta_t}{\beta_u}} \quad (8.11)$$

U skladu sa prethodnim jednačinama i pod pretpostavkom da je koeficijent r isti za sve kvantile mogu se ustanoviti veze:

$$u_{p63}(t_{p1})[t_{p1}]^{\frac{1}{r}} = C_{63} \quad (8.12)$$

$$\frac{\beta_t}{\beta_u} = \frac{1}{r} \quad (8.13)$$

odakle se dobija se veza između β_t i β_u . Ova relacija važi samo ako oba navedena parametra pripadaju Weibulovoj raspodeli.



Sl. 8.4 Izvođenje karakteristike životnog veka; a) Empirijska funkcija raspodele vremena do proboja t_p ; b) Karakteristika životnog veka – r ; c) empirijska funkcija raspodele napona proboja U_p [10]

Sa Sl. 8.4 se može videti da iz karakteristike životnog veka može da se utvdi životni vek električne mašine uz pridruženi kvantil verovatnoće (statistička veličina). U ovom slučaju na Sl. 8.4 taj kvantil je 63,2 %, dok se u radu koriste i kvantil od 10 % i 63,2 %.

U slučaju da se napon diže u koracima (*step voltage*) formula (8.1) može se primeniti na sledeći način.

$$(U_1^r + q^r U_1^r + q^{2r} U_1^r + \dots + q^{(p_1-1)r} U_1^r) T_1 + q^{p_1 r} U_1^r t_1 = C$$

$$(U_2^r + q^r U_2^r + q^{2r} U_2^r + \dots + q^{(p_2-1)r} U_2^r) T_2 + q^{p_2 r} U_2^r t_2 = C$$

gde su:

- T_1 - vreme trajanja napona u pojedinačnom koraku (u prvom eksperimentu je 1 minut)
- T_2 - vreme trajanja napona u pojedinačnom koraku (u drugom eksperimentu je 15 minuta)
- p_1 - broj koraka do proboja za eksperiment od jednog minuta,
- p_2 - broj koraka do proboja za eksperiment od 15 minuta,
- t_1 - vreme trajanja do proboja (<1 min) na poslednjem koraku za eksperiment od jednog minuta
- t_2 - vreme trajanja do proboja (<15 min) na poslednjem koraku za eksperiment od 15 minuta.

Uz uslove $U_1^n = U_2^n$; $C_1 = C_2$ sledi:

$$T_1 \cdot U_1^r \cdot \left(\frac{q^{rp_1-1}}{q^r-1} + q^{p_1 r} \frac{t_1}{T_1} \right) = C_1$$

$$T_2 \cdot U_1^r \cdot \left(\frac{q^{rp_2}-1}{q^r-1} + q^{p_2 r} \frac{t_2}{T_2} \right) = C_1$$

$$T_1 \cdot U_1^r \cdot \left(\frac{q^{rp_1-1}}{q^r-1} + \frac{q^{p_1 r}(q^r-1)}{q^r-1} \frac{t_1}{T_1} \right) = C_1$$

$$T_2 \cdot U_1^r \cdot \left(\frac{q^{rp_2}-1}{q^r-1} + \frac{q^{p_2 r}(q^n-1)}{q^r-1} \frac{t_2}{T_2} \right)$$

Količnik prethodne dve jednačine:

$$\frac{T_2}{T_1} \frac{q^{rp_2}-1 + q^{p_2 r}(q^r-1) \frac{t_2}{T_2}}{q^{rp_1}-1 + q^{p_1 r}(q^r-1) \frac{t_1}{T_1}} = 1$$

Uz uslove $q^{rp_2} \gg 1$ i uvođenjem smene $(q^r-1) \frac{t_2}{T_2} \sim (q^r-1) \frac{t_1}{T_1} = x$ za realne brojeve koji se očekuju dobijamo:

$$\frac{T_2}{T_1} \frac{q^{rp_2} + x q^{p_2 r}}{q^{rp_1} + x q^{p_1 r}} = 1$$

$$\frac{T_2}{T_1} \frac{q^{rp_2}}{q^{rp_1}} \frac{1+x}{1+x} = 1.$$

Iz dobijene formule može se aproksimativno izraziti odnos:

$$\left(\frac{q^{p_2}}{q^{p_1}}\right)^r \approx \frac{T_1}{T_2} / \ln$$

$$r \cdot \ln\left(\frac{q^{p_2}}{q^{p_1}}\right) \approx \ln \frac{T_1}{T_2}$$

$$r(\ln q^{p_2} - \ln q^{p_1}) \approx \ln \frac{T_1}{T_2}$$

$$r(p_2 \cdot \ln q - p_1 \cdot \ln q) \approx \ln \frac{T_1}{T_2}.$$

Iz prethodne jednačine može se aproksimativno doći do izraza za eksponent starenja n:

$$r \approx \frac{\ln \frac{T_2}{T_1}}{(p_1 - p_2) \ln q}$$

$$r \approx \frac{\ln 15}{(p_1 - p_2) \ln 1,03}$$

$$r \approx \frac{91,615}{(p_1 - p_2)}.$$

Ovako dobijen koeficijent starenja eksperimentalno se potvrđuje.

8.7. Karakteristike starenja statorske izolacije

Starenje statorske izolacije je pojava degradacije izolacionog materijala i sistema u celini tokom eksploatacije koja dovodi do postepenog gubitka projektovanih karakteristika. Pri tome ne dovode nužno svi procesi do pojave slabih mesta jednako brzo i na istom mestu. Slaba mesta se najčešće otkrivaju pojavom pražnjenja na delovima na kojima inače ne bi došlo do toga.

Pražnjenja nastaju na glavama namotaja obrtnih mašina, raznim uvodnicima i drugim mestima. Tokom eksploatacije najčešće se stvore uslovi za pojavu puzajućih struja, tj. pražnjenja po razdvojnoj površini dielektrik-vazduh (gas). U Tab. 8.1. sistematizovani su uticaji pojedinih procesa na starenje EIS statora obrtnih mašina. [13]

Tab. 8.1 Uticaji pojedinih dominantnih procesa na starenje EIS statora. [13]

NAZIV NAPREZANJA	TIP IZOLACIJE	OPIS MEHANIZMA STARENJA	VRSTA KVARA (način kvara)	OPŠTI SIMPTOMI
Termička starenja, nepovratni procesi	Asfalt-liskun, liskun listići	Na temperaturama $>100^{\circ}\text{C}$ nestaje vezivni materijal, nastaju delaminacije, smanjuje se termička provodnost;	Deformacije izolacije, pomeranja, abrazija, <i>PP, proboj; starenje se ubrzava</i>	Bubrenje izolacije, skidanje (gubitak) boje izolacije, <u>visoka unutrašnja PP</u>
Pregrevanje	Epoksi-liskun; poliesterski liskun	na visokim temperaturama opadaju fizička čvrstoća, termička provodnost, <i>starenje se ubrzava</i>	Ubrzava mehanizme starenja, inteziviraju se <u>pražnjenja</u>	Labavost u žljebu, skidanje boje izolacije, raste temperatura.
Razaranje veziva	Asfalt i liskun listići	Gubitak veziva, delaminacija	Pucanje izolacije vodi do <u>PP</u> i proboja	Bubrenje izolacije <u>visoka aktivnost unutrašnjih PP</u> .
Pražnjenje u žlebu (žlebu) – mehanički uzrok	Epoksid-liskun, poliesterski liskun,	Izolacija slabog kvaliteta ili sistem za učvršćivanje dozvoljava labavost i izaziva abraziju poluprovodnog (nisko otpornog) premaza i izolacije	Smanjenje debljine izolacije, <u>PP u žljebu</u> , električni proboj	Beli prah od abrazije, labavost sistema učvršćivanja, <u>visok nivo PP, oštećen r</u> poluprovodni sloj
Pražnjenje u žlebu- električni uzrok	Tip izolacije je kao u prethodnom slučaju	Loša izolacija ili siromašan premaz poluprovodnim slojem prouzrokuju PP, što dovodi do smanjenja izolacionog zida i abrazije	Smanjenje debljine izolacije, <u>PP u žljebu</u> , električni proboj	Simptomi su kao u prethodnom slučaju
Pražnjenje zbog raslojavanja	Svi tipovi izolacije, ali su	Intenzitet PP raste, Slabi vezivo zbog termomehaničkih ciklusa,	Proboj glavne izolacije štapa; kratak spoj štap-štap	Umerena do visoka aktivnost

NAZIV NAPREZANJA	TIP IZOLACIJE	OPIS MEHANIZMA STARENJA	VRSTA KVARA (način kvara)	OPŠTI SIMPTOMI
	Termo- plastični osetljiviji	rada na visokoj temperaturi	ako izolacija navojka prva otkaže	unutrašnjih PP, izolacija bubri
Pražnjenje na kraju štapa	Svi tipovi	Mala rastojanja na kraje-vima štapova, degradiran nisko- otporni sloj, kontaminacija	Erozija izolacije usled pražnjenja i električnih puzajućih struja dovodi do proboja	visoka PP, gubitak poluprovodnih slojeva i njegova fragmentacija
Uticaj vlage	Svi tipovi, ali poliester- liskun naj osetljiviji	Vlaga iz sistema za hlađenje ili kondenzacija smanjuju električnu i mehaničku čvrstoću izolacije	Povećanje osetljivosti na mehaničke vibracije, povećanje, $\tan \delta$, proboj	Nizak indeks polarizacije, visok faktor gubitaka $\tan \delta$
Uticaj abrazivnih metala	Svi tipovi otvorenih mašina	Abrazivna prašina iz vazduha oštećuje izolaciju	Proboj usled smanjene debljine izolacije	Izolacioni prah, labavi namotaji
Radijacija	Svi tipovi u radio- aktivnom okruženju	U veoma radioaktivnom prostoru, izolacija degradira, gubi električnu i mehaničku čvrstoću, slično termičkom starenju	Proboj, npr. u toku udara kao što je udar zbog loše sinhronizacije, udar kod starta motora itd	Labavljenje namotaja, skidanje boje, stvaranje krtosti izolacije
Vibracija od 100 Hz (120 Hz)	Svi tipovi, ali su epoksid- liskun naj osetljiviji	Elektromagnetne sile, abrazija izolacije	Smanjenje debljine izolacionog zida, proboj faza-faza ili faza-zemlja ili proboj unutar navojaka	Beli prah, pokidane spojne veze, visoka PP u žljebu.
Mehanička naprezanja	Svi tipovi, a naročito kod motora	Veliki skok struje pri startu mašine stvara velike mehaničke sile koje prekoračuju mekaničku čvrstoću izolacije	Pokidane veze učvršćenja glava i labavi namotaji vode do abrazije izolacije i proboja	Gubitak veza učvršćenja, pokidane veze na glavama štapova, beli prah

8.8. Karakteristike starenja kablovske izolacije

Pored navedenih kategorisanih procesa degradacije izolacionog materijala i sistema kablova postoje određene specifičnosti. Kabl se odlikuje dugačkim deonicama, brojnim spojnim elementima i završnicama, teškim pristupom položenim kablovima, vrlo neujednačenim uslovima eksploatacije duž deonice. U tim uslovima, postavlja se veliki izazov upravljanja životnim vekom kabla, pouzdanošću i efikasnošću.

Faktori starenja kabla su toplotna, električna, mehanička i naprezanja zbog okoline, koji mogu delovati pojedinačno ili sinergistički. Međutim, praksa pokazuje da, kada se opterećenja drže ispod praga naprezanja (praga aktivacije), izolacija kablova možda neće pokazati znake starenja s vremenom. Kao što je ranije napomenuto, mnogi kablovi sa papirnom izolacijom i olovnom plaštom (PILC) u eksploataciji od dvadesetih godina prošloga veka još ne pokazuju znake skorog kvara. Sa druge strane od modernih XLPE kablova se očekuje eksploatacija duža od 40 godina, u normalnim okolnostima. [53] Međutim dešava se ispad iz pogona nakon dvadesetak godina. Razlog su odeđene neprilagođenosti uslovima eksploatacije kao što su vlaga, tranzijenti, ciklusi grejanje/hlađenje i drugi. U Tab. 8.2 dati su osnovni faktori starenja EIS kablova.

Tab. 8.2 Uticaji pojedinih dominantnih procesa na starenje EIS kablova [22]

NAZIV NAPREZANJA	KATEGORIJA STARENJA	POSLEDICE	OPŠTI SIMPTOMI
ambijentalna temperatura temperatura džulovih gubitaka	temperaturno starenje	oksidacija, dekompozicija, migracije, dehidrohlorovanje isparenje	opadanje dielektrične čvrstoće, opadanje žilavosti i elastičnosti porast ugla gubitaka
šupljine izbočine kontaminacija defekti	električno starenje	parcijalna pražnjenja	
savijanje istezanje kompresija torzija vibracije	mehaničko starenje	vodeni žbun električni žbun	
vlaga kiseonik hemikalije radijacija	starenje zbog okruženja	prostorno naelektrisanje hemijske promene fizičke promene	opadanje otpornosti

Ne postoji jedinstven model starenja kablova zbog različitih fizičko-hemijskih procesa i aktivacija. U upotrebi je često kombinacija raznih modela, uzimajući u obzir praktične rezultate praćenja stanja i reakciju izolacije na dugotrajne faktore naprezanja tokom rada i računanje efekata kratkotrajnih naprezanja.

Poseban izazov za dijagnostiku položenih i teško dostupnih kablova je utvrđivanje nedestruktivnih metoda i njihovog značaja i doprinosa proceni starosti kabla. Jedna od metoda ispitivanja izolacije je merenje otiska na definisani pritisak kao mera elastičnosti. Koriste se i električne i akustičke metode, sa manje ili više uspeha, za određivanje modula elastičnosti materijala kabla. Koriste se i IC spektroskopija, IR mikrospektroskopija, SEM i EDX analize.

U ovom trenutku razumevanja problema i prakse, kriterijumi procene kraja životnog veka definiše se kao smanjeno istežanje pri prekidu na 50% u odnosu na fabrički podatak.

Mogu da se koriste i drugi kriterijumi, kao na primer probojni napon, i određeni modeli starenja za njega.

9. ISPITIVANJA, REZULTATI I ANALIZE

Ispitivanja se odnose na utvrđivanje mogućnosti predikcije stanja izolacionog sistema visokonaponske elektroenergetske opreme i kablova primenom zakona porasta verovatnoće određenog ishoda. Ishodi koji su istraživani su:

- parcijalna pražnjenja - naponski prag pojave (PDIV),
- probojni napon - dielektrična izdržljivost (VBD),
- procena vremena do proboja – starenje.

Objekti na koje se odnosi istraživanje su:

- visokonaponske obrtne mašine,
- srednjenaponski kablovi.

U skladu sa postavljenim zadatkom vršen je izbor i priprema uzoraka. Uzorci su podeljeni u dve kategorije:

- uzorci od korišćenih objekata, iz eksploatacije,
- uzorci od novih objekata, iz proizvodnje.

Uzorci izolacionog sistema obrtnih mašina su delovi izolovanih elementarnih provodnika izuzetih iz statorskog namotaja, zatim delovi namotaja sa očuvanom strukturom izolacije i provodnika (od poprečno sečenih namotaja). Za ispitivanje zakona porasta verovatnoće formiraju se uzorci su različitih veličina, prema određenoj skali uvećanja kao i originalni namotaji, odnosno delovi namotaja, kanure, sa originalnim izolacionim sistemom. Za ispitivanje zakona starenja korišćeni su celi delovi namotaja odnosno kanure. Naponski nivo izolacionog sistema uzoraka koji je korišten za eksperimente je 6 kV.

Uzorci visokonaponskih kablova su gotovi originalni kablovi sa završnicama koji služe kao spojni kablovi u srednjenaponskim postrojenjima. Tip kabla je IPO 13 3x240 mm², 10 kV. Setovi uzoraka su korišćeni za zakon porasta i za zakon starenja odnosno procene životnog veka.

Za visokonaponska ispitivanja korišćeno je više uređaja i opreme, u skladu sa zahtevima. Rezultati merenja su u najvećoj meri prikupljeni automatski i delom ručno, i čuvani su u određenim datotekama i formatima pogodnim za dalju obradu. Za obradu podataka korišćeni su softverski paketi MatLab, MS Office, OriginLab, SPSS i R Studio.

Analize rezultata su vršene u skladu sa važećim standardima i ekspertskom i naučnom praksom. Rezultati merenja i analiza su prikazani u tabelama i dijagramima.

9.1. Merna i ispitna oprema i procedure

Sva merenja i ispitivanja su vršena prema odgovarajućim standardima koji definišu uslove ispitivanja [15] [17] [3] [67] [16] [18] opšte zahteve i procedure za date objekte,

zahteve za postupke opisi metoda, opšti zahtevi za merne instrumente, zatim postupak i metode za procenu merne nesigurnosti. Takođe, dati su i okvirni kriterijumi za obradu i analizu rezultata ispitivanja.

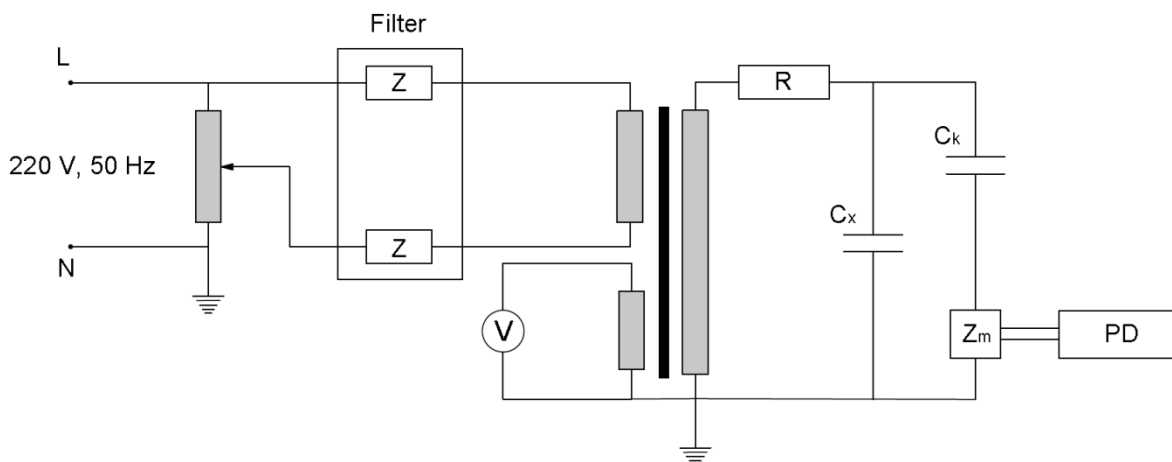
Vršena ispitivanja od interesa za data istraživanja su:

- ispitivanje električnog otpora izolacije,
- ispitivanje faktora dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$),
- ispitivanje parcijalnih pražnjenja (PDIV),
- ispitivanje probojnog napona (VBD) odnosno vremena do proboja.

Za merenje električnog otpora izolacionog sistema koristi se UI metoda, uređajem za merenje visokih vrednosti otpora, megaommetrom, koji ima ugrađen sopstveni izvor visokog *stabilnog jednosmernog napona*, podesivog u opsegu (500, 20000)VDC. Postupak merenja otpora izolacionog sistema je kompleksniji jer se otpor (odnos U/I) izrazito menja tokom prvih sekundi i minuta merenja. Zato se istovremeno sa merenjem otpora izolacionog sistema meri i indeks polarizacije. Otpor se meri posle 15s, 60s (1 minut) i posle 600s (10 minuta) pri čemu se dobijaju vrednosti za R_{15} , R_{60} i R_{600} respektivno. Izračunavanjem odnosa $N_1 = \frac{R_{60}}{R_{15}}$ određuje se koeficijent apsorpcije a izračunavanjem odnosa $N_2 = \frac{R_{600}}{R_{60}}$ indeks polarizacije.

Za merenje faktora dielektričnih gubitaka $\tan \delta$ i kapaciteta izolacionog sistema korišćen je namenski merni uređaj na principu merenja aktivne i reaktivne snage.

Nakon utvrđivanja stanja uzoraka pomoću merenja otpora, $\tan \delta$ i kapaciteta pristupa se visokonaponskim ispitivanjima parcijalnih pražnjenja, probojnog napona i vremena do proboja na određenom naponu (ispitivanje starenja). Na Sl. 9.1 data je šema visokonaponskog ispitnog kola. Na Sl. 9.2 i Sl. 9.3 su prikazana ispitivanja PDIV i VBD na uzorcima obrtnih mašina i kablova, respektivno.



Sl. 9.1 Šema visokonaponskog ispitnog kola. R – zaštitni otpornik za ograničavanje struje; C_x – objekat; C_k – sprežni kondenzator; Z_m – prilagodna impedansa; PD – detektor parcijalnih pražnjenja

Korišćen je AC visokonaponski ispitni transformator (100kV, 50 Hz) sa podesivom brzinom podizanja napona, najčešće 200 V/min. Moguće je i skokovito (step) podizanje napona. Efektivna vrednost i amplituda AC napona je merena kompenzovanim kapacitivnim deliteljem i digitalnim voltmetrom i osciloskopom. Tokom ispitivanja prvo je određivan PDIV kao nedestruktivni postupak a zatim VPD kao destruktivni postupak, zbog racionalnog korišćenja uzoraka.



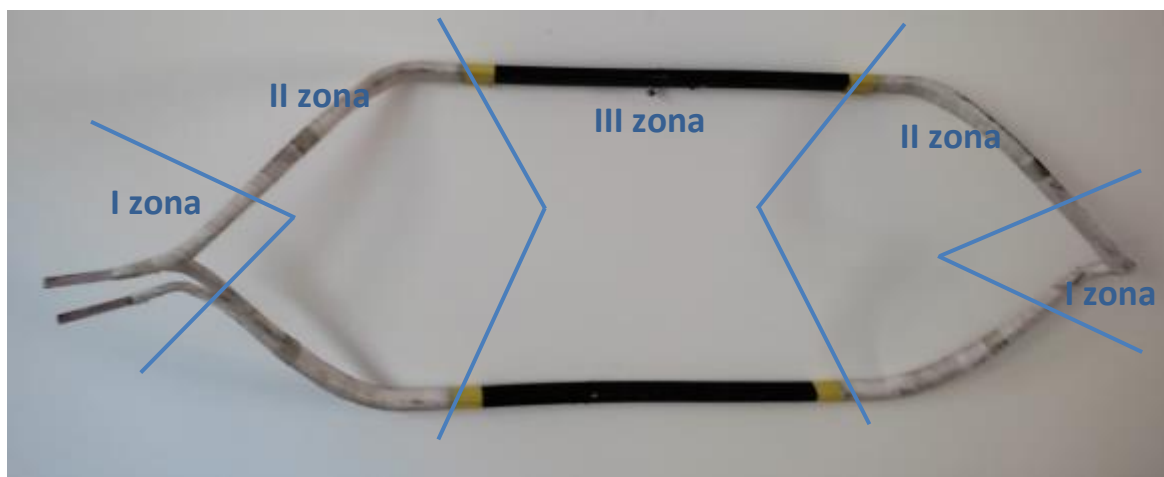
Sl. 9.2 Ispitivanje PDIV i VBD na uzorcima VN mašine



Sl. 9.3 Ispitivanje PDIV i VBD na uzorcima kablova

9.2. Uzorci za ispitivanje izolacionog sistema obrtne mašine

Ispitivani uzorci su izuzimani kako iz novih namotaja tako i iz namotaja koji su bili u eksploataciji deset godina. Uzorci su formirani od delova kanure ali su korišćene i cele kanure. Tipska kanura od koje su formirani uzorci kao i prikaz različitih delova namotaja (interesne zone) su dati na Sl. 9.4.



Sl. 9.4 Tipska kanura. Prikaz interesnih zona namotaja I, II i III

Opravdanje da se uzorci formiraju iz različitih delova kanure leži u činjenici da je formiranje kanure tehnički složen proces. Izolovani provodnik se namotava na određenu formu i dodaje se međunavojna izolacija. Zatim se pristupa složenim mehaničkim operacijama formiranja konačnog oblika kanure koje se odlikuju različitim naprezanjima izolacione strukture, tako da se mogu se izdvojiti tri osnovne zone od interesa za istraživanje.

Prva zona (I zona, Sl. 9.4) predstavlja polukružni deo provodnika sa dvostrukom prostornom krivinom malog poluprečnika, na krajevima (glavama) kanure. Ona predstavlja zonu sa najintenzivnijim mehaničkim naprezanjem izolacije tokom formiranja nove kanure (savijanje i uvrtnje-torzija) ali i najvećih naprezanja tokom eksploatacije, pre svega zbog vibracija. Naponska naprezanja zavise od načina organizacije prostora glava namotaja u smislu blizine glave druge faze, blizine steznih (uzemljenih) prstenova i drugo.

Druga zona (II zona, Sl. 9.4) predstavlja lučni deo namotaja koji povezuje pravi deo namotaja (zona III) i dvostruko savijen deo (zona I), odnosno predstavlja deo od izlaza kanure iz statorskog žljeba pa do glave namotaja. Odlikuje se manjim mehaničkim naprezanjima izolacije tokom formiranja kanure u odnosu na zonu I, prvenstveno zbog manjih krivina savijanja i drugih deformacija. Međutim, zbog diskontinuiteta mehaničkih i magnetnih sila, diskontinuiteta naprezanja električnim poljem predstavlja najkritičniji deo kanure. Mehanički problemi koncentracija napona i sopstvenih frekvencija se rešavaju projektovanjem masa i mehaničkih veza glava kanura. Problem profilisanja nehomogenosti električnog polja se rešava poluprovodnim premazom u zoni glave sa dobrim preklapanjem sa slaboprovodnim slojem zone III. I pored dobrih fabričkih rešenja,

eksploatacija donosi niz izazova, kao što su pucanja veza ukrućenja, rezonance, pucanje veza i slojeva premaza. Zbog toga dolazi do bržeg starenja ovih delova namotaja (zona II) i do proboja.

Treća zona (III zona, Sl. 9.4) predstavlja ravan deo provodnika koji se smešta u žljeb. Ova zona trpi najmanja mehanička naprezanja tokom formiranja namotaja. Tokom eksploatacije trpi nizak nivo mehaničkih vibracija. I pored toga što je ovaj deo izolacija namotaja izložena najjačem električnom polju, zbog kompaktnosti konstrukcije najmanje dolazi do starenja i proboja.

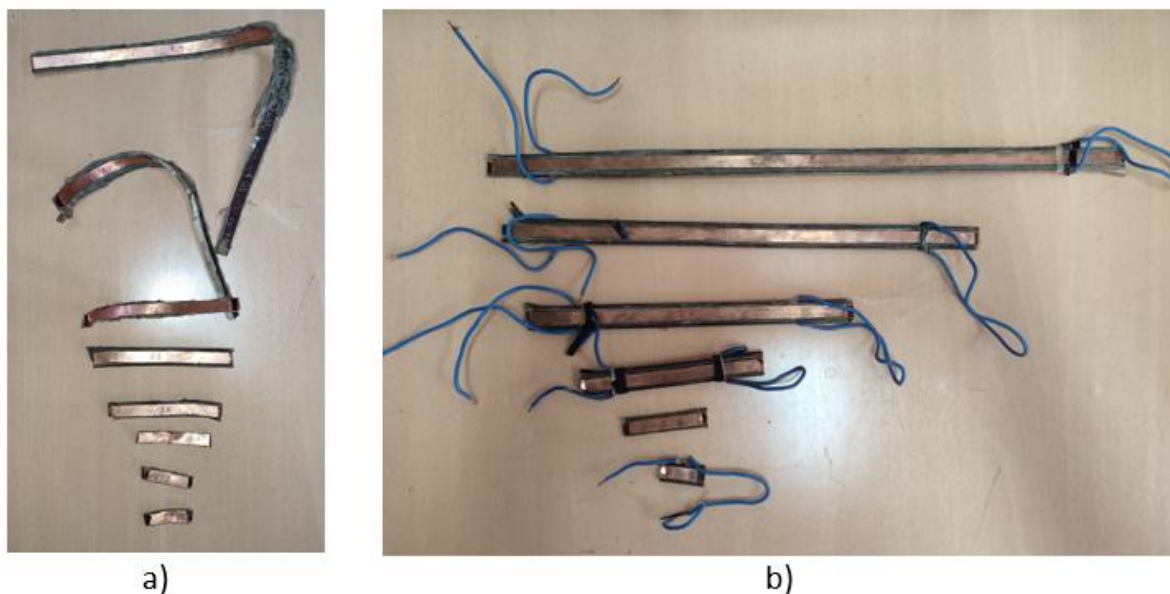
Sistem ispitivanih uzoraka je vrlo složen, struktura je data u Tab. 9.1. Usled preobimnosti, u radu su prikazani samo rezultati markirani plavom bojom. Za ispitivanje zakona porasta verovatnoće ishoda sa porastom površine izolacije formirani su uzorci iz svake zone prema definisanoj skali uvećanja (Sl. 9.4). Korišćene su i cele kanure gde je zakon porasta ispitivan u korelaciji sa brojem kanura. Za ispitivanje zakona starenja odnosno proboja u funkciji vremena optrećenja korišćene su cele kanure.

Tab. 9.1 Struktura setova formiranih uzoraka za motore

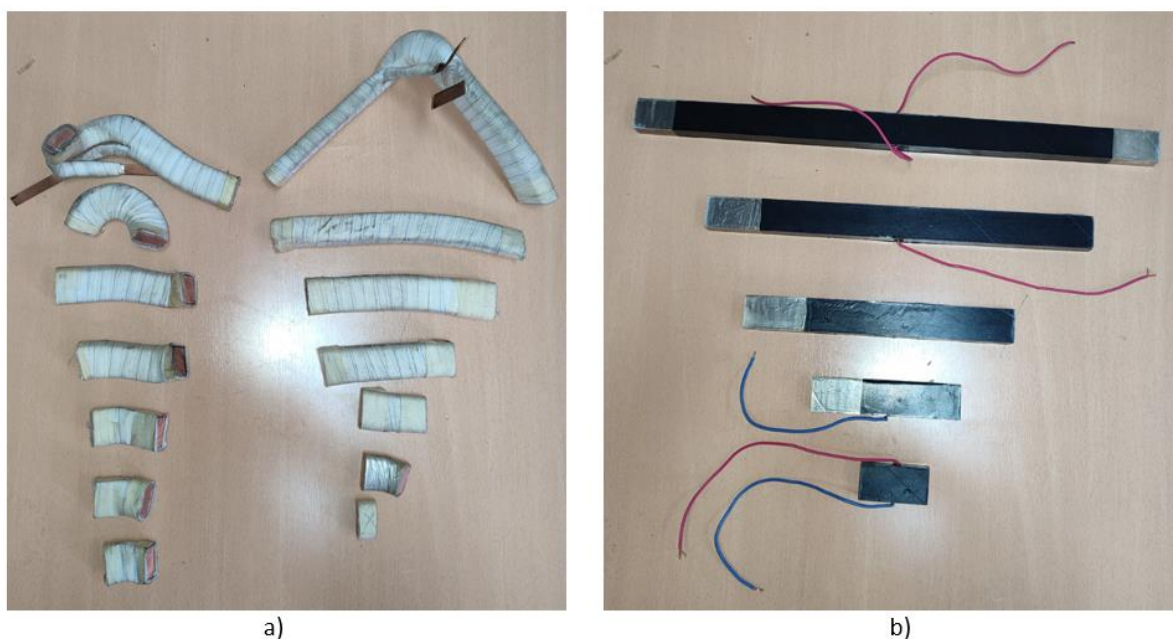
Tip ispitivanja	Zakon porasta površine (n)						Zakon starenja	
<i>dvosl./višesl. novi/stari</i>	<i>dvosl. novi</i>	<i>dvosl. stari</i>	<i>višesl. novi</i>	<i>višesl. stari</i>	<i>kanura nova</i>	<i>kanura stara</i>	<i>kanura nova</i>	<i>kanura stara</i>
<i>oznaka uzorka</i>	N_{2N}	N_{2S}	N_{MN}	N_{MS}	K_{CN}	K_{CS}	K_{RN}	K_{RS}
broj uzoraka za PDIV	Zona I 50	Zona I 50	Zona I 50	Zona I 50	20	20	/	/
	Zona II 50	Zona II 50	Zona II 50	Zona II 50				
	Zona III 50	Zona III 50	Zona III 50	Zona III 50				
broj uzoraka za VBD	Zona I 50	Zona I 50	Zona I 50	Zona I 50	20	20	10	10
	Zona II 50	Zona II 50	Zona II 50	Zona II 50				
	Zona III 50	Zona III 50	Zona III 50	Zona III 50				

Iz novih odnosno (deset godina) starih kanura formirani su pre svega „dvoslojni novi” i „dvoslojni stari” uzorci gde dva sloja izolacije potiču od izolacije dva elementarna provodnika isečena iz sistema kanure. Drugi tip uzoraka, nazvan „višeslojni novi” i „višeslojni stari” dobijen je poprečnim sečenjem kanure pri čemu je sačuvana struktura izolacije, osnovna, međuslojna i glavna spoljna izolacija. Broj formiranih uzoraka je po 8 za svaku od tri zone.

Na Sl. 9.5 su prikazani dvoslojni uzorci različitih podužnih površina; a) zona I; b) zona III namotaja. Na Sl. 9.6. su prikazani višeslojni uzorci različitih podužnih površina a) zona I i II; b) zona III namotaja.



Sl. 9.5 Dvoslojni uzorci različitih podužnih površina a) zona I; b) zona III



Sl. 9.6 Višeslojni uzorci različitih podužnih površina uzeti iz zone III namotaja

Za svaki tip uzorka koji je uzet iz istog dela namotaja, do 8 uzoraka sa različitim površinama je uzimano. Za svaki tip uzorka uzet iz istog dela namotaja i iste površine, do 50 identičnih uzoraka je napravljeno u statističkom smislu.

Nakon ispitivanja statističkih uzoraka za slučajne promenljive PDIV i VBD primenjen je modifikovani Šoveneov kriterijum (Chauvenet's criterion) za odbacivanje sumnjivog merenja odnosno oštećenih uzoraka. [68] [69]

Statistički identitet uzoraka je verifikovan merenjem $tg\delta$ i pomoću U testa. U test je primenjen tako što su se formirali poduzorci od po deset ili dvadeset uzoraka, zavisno od tipa uzorka. Za svaki tip uzorka, vršeno je ispitivanje da li statistički poduzorci pripadaju istoj statističkoj raspodeli. Kritična vrednost kao kao granica prihvatanja ili odbacivanja testa je bila 5 %.

Površina podužnog preseka provodnika ispitivanih uzoraka i odgovarajući faktori uvećanja su dati u Tab. 9.2.

Tab. 9.2 Površina provodnika ispitivanih dvoslojnih uzoraka i odgovarajući faktori uvećanja.

Uzorak n	Zona I		Zona II		Zona III	
	Površina provodnika (mm ²)	Factor uvećanja n	Površina provodnika (mm ²)	Factor uvećanja n	Površina provodnika (mm ²)	Factor uvećanja n
1	325	1,00	324	1,00	143	1,00
2	389	1,20	360	1,11	248	1,73
3	602	1,85	540	1,67	459	3,21
4	795	2,45	783	2,42	972	6,80
5	983	3,02	990	3,06	1422	9,94
6	1402	4,31	1332	4,11	1854	12,96
7	2400	7,38	2394	7,39	2345	16,40
8	3638	11,19	3591	11,08	3421	23,92

Krajevi oba tipa uzorka su izolovani sa slojem LGGL izolacije i epoksidne smole pri čemu su u nekim slučajevima dodavani plastični zaštitni čepovi da bi se sprečili površinski proboji. Sa Sl. 9.7 se može videti da je posebna pažnja posvećena da se spreči pojava površinskog proboja korišćenjem zaštitnih elektroda i stavljanje izolacionih čepova na završetke uzorka.



a)

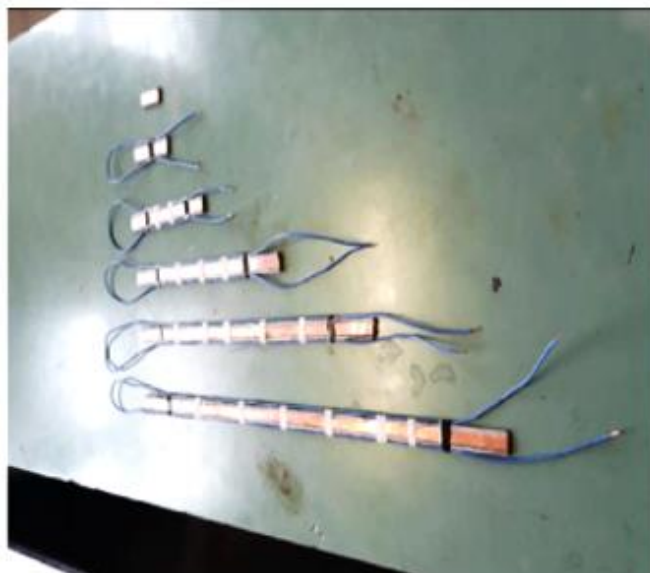


b)

Sl. 9.7 Uzorci sa zaštitnim elementima: a) dvoslojni uzorak sa zaštitnom elektrodom i zaštitnim čepovima; b) višeslojni uzorak sa zaštitnim čepovima

Da bi se sprečili površinski proboji preduzimane su sledeće mere:

- kad god je bilo neophodno, na svaki uzorak je stavljan izolacioni zaštitni čep;
- ivice elementarnih provodnika su bile filetirane
- postavljala se zaštitna elektroda koja je uzemljena (Sl. 9.7 a, Sl. 9.8 a)
- Ispitivanja su vršena u ulju (Sl. 9.8 b)



a)



b)

Sl. 9.8 a) Postavljanje zaštitne uzemljene elektrode; b) Ispitivanje uzoraka u ulju

Poseban tip uzoraka predstavljaju kanure kao celi netaknuti delovi namotaja. Eksperimenti na celim namotajima izvedeni su sa 20 novih namotaja i 20 namotaja koji su bili u eksploataciji deset godina.

9.3. Rezultati ispitivanja i analiza za obrtne mašine

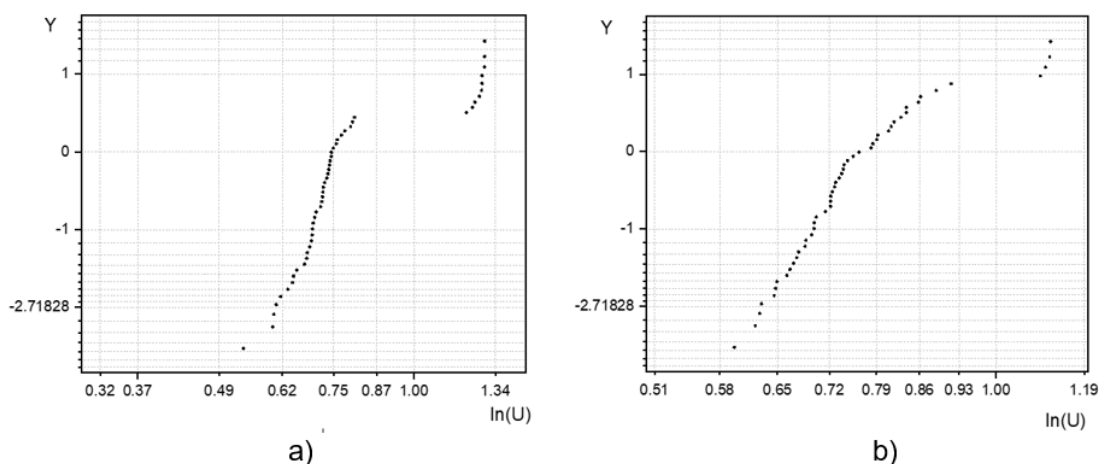
9.3.1. Zakon porasta verovatnoće i modeli

Da bi se odredila statistička raspodela koja je eksperimentalno dobijena slučajnim promenljivim PDIV (napon praga parcijalnih pražnjenja) i VBD (napon proboja), dvoslojni i višeslojni uzorci su bili grafički ispitivani na pripadnost normalnoj raspodeli, troparametarskoj i dvoparametarskoj Vejbulovoj raspodeli i eksponencijalnoj raspodeli. Početna pripadnost slučajnih promenljivih utvrđena je grafičkim testom. Rezultati grafičkih testova verifikovani su χ^2 – testom i Kolmogorovim testom. Ispitivanje je bilo izvedeno na osnovnom uzorku ($n=1$).

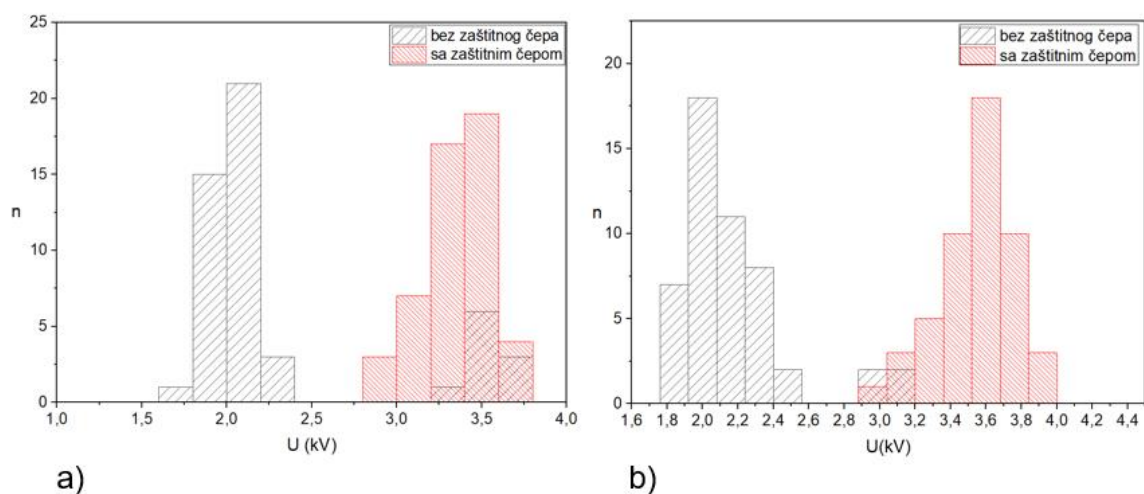
Na osnovu grafičke analize rezultata za slučajne varijable PDIV i VBD može se zaključiti da sve slučajne promenljive pripadaju kompleksnoj dvostrukoj troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli aditivnog tipa sa preovlađujućom nižom komponentom napona, Sl. 9.9 i Sl. 9.11.

Ovako složen oblik, aditivnog tipa, za predstavljenu raspodelu funkcije za slučajne promenljive PDIV i VBD proizilazi iz mogućnosti pojave površinskog (ivičnog) parcijalnog pražnjenja i pražnjenja u međuslojnom LGGL izolatoru, tj mogućnost pojave površinskog i unutrašnjeg proboja.

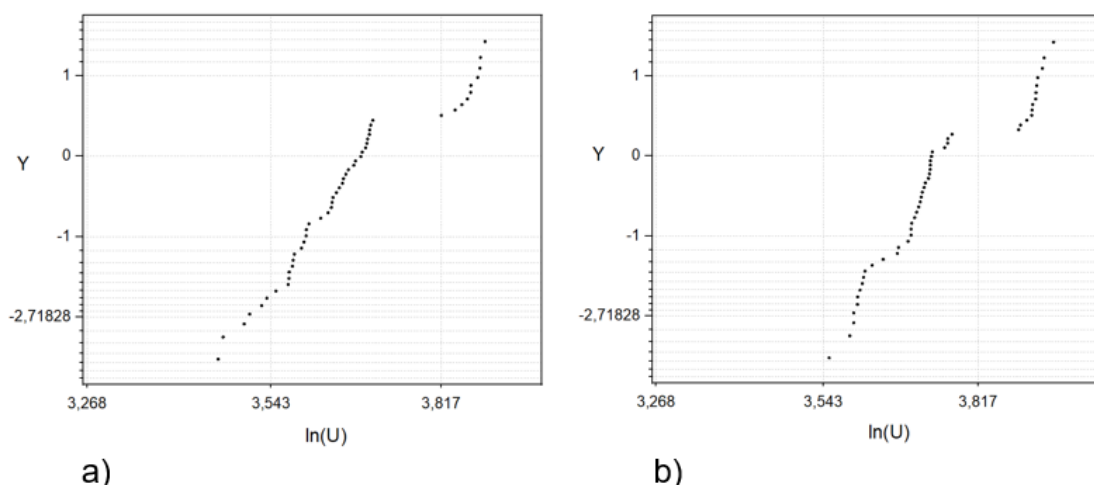
Histogrami klase $(1+3,3\log(n))$ za slučajne veličine PDIV - N_{2s} sa i bez zaštite od površinskog proboja su prikazani na Sl. 9.10. Sl. 9.12 prikazuje histograme klase $(1+3,3\log n)$ za slučajne veličine VBD - N_{MS} sa i bez zaštite od površinskog proboja.



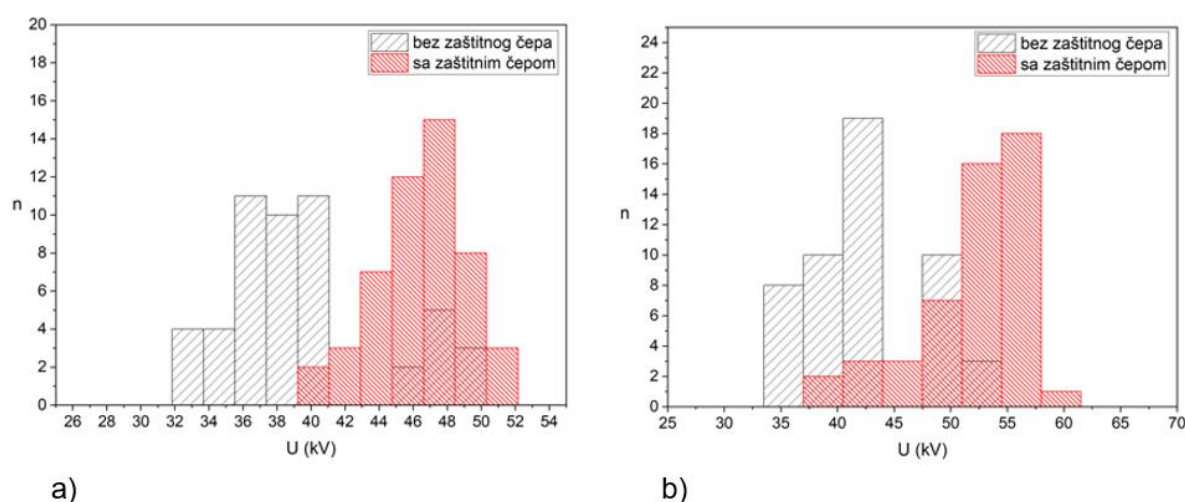
Sl. 9.9 Vejbulov papir verovatnoće za slučajne veličine PDIV - N_{2s} : a) zona II; b) zona III



Sl. 9.10 Histogrami klase $(1+3,3\log n)$ za slučajne veličine PDIV - N_{2S} sa i bez zaštite od površinskog proboja; a) b) zona II; zona III



Sl. 9.11 Vejbulov papir verovatnoće za VBD - N_{MS} ; a) zona I; b) zona III



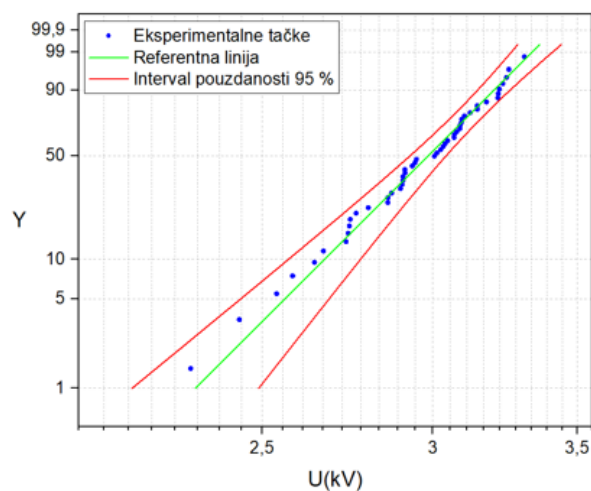
Sl. 9.12 Histogrami klase (1+3,3logn) za slučajne veličine VBD - N_{MS} sa i bez zaštite od površinskog proboja; a) zona I; b) zona III

Rezultati prikazani na Sl. 9.9 – Sl. 9.12 potvrđuju napred postavljenu pretpostavku o uzroku složene funkcije raspodele aditivnog tipa za sve predstavljene funkcije raspodele za slučajne promenljive PDIV i VBD na uzorcima. Ovi rezultati pokazuju da u normalnim uslovima (bez zaštite od površinskog proboja, odnosno u realnim uslovima eksploatacije) preovlađujući broj električnih pražnjenja ($\sim 80\%$) se javlja usled površinskog pražnjenja (tj. iniciran je ivičnim efektom). Ponavljanjem istih ispitivanja u ulju i na uzorcima sa filetiranim ivicama i sa zaštitnom uzemljenom elektrodom drastično se smanjio doprinos slučajnih promenljivih usled ivičnog efekta, tj. usled površinskih pražnjenja.

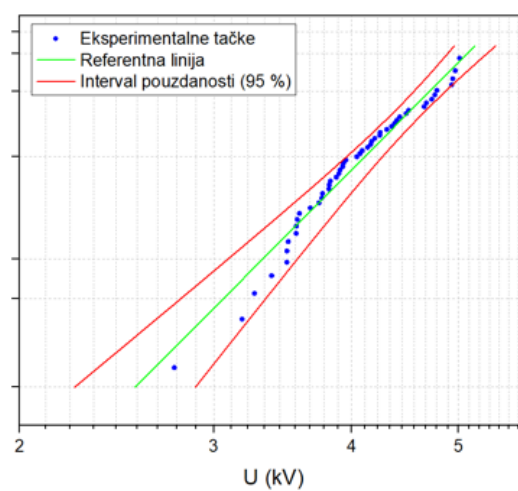
Na Sl. 9.13 su prikazani Vejbulovi papiri verovatnoće za PDIV za različite tipove uzoraka iz različitih zona namotaja (a) N2S zona I; b) N2N zona II; c) NMS zona II; d) NMN zona II). Na Sl. 9.14 su prikazani Vejbulovi papiri verovatnoće za VBD za različite tipove uzoraka iz različitih zona namotaja (a) N2s zona I; b) N2N zona III; c) N_{MS} zona III; d) N_{MN} zona III).

Rezultati sa Sl. 9.13 i Sl. 9.14 pokazuju da slučajne veličine PDIV i VBD pripadaju Vejbulovoj troparametarskoj raspodeli. Sa slika se može videti da većina

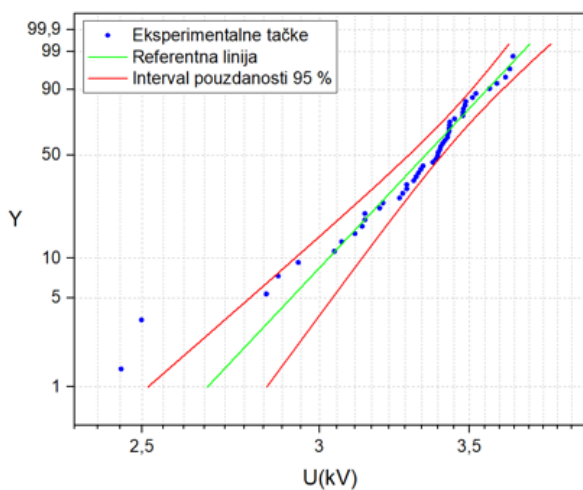
eksperimentalnih tačaka upada u 95 % interval pouzdanosti. Ovo je potvrđeno χ^2 – testom i Kolmogorovim testom.



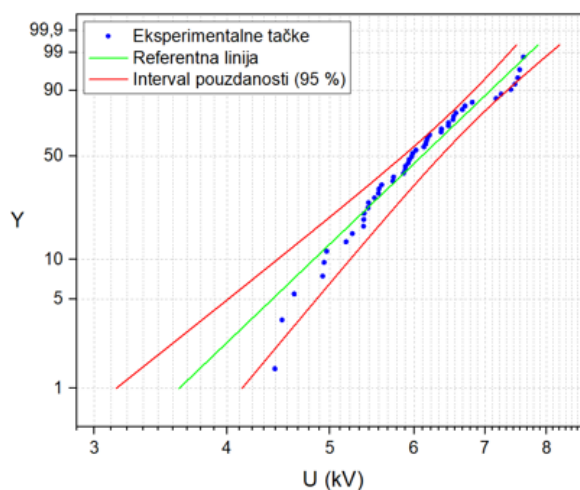
a)



b)

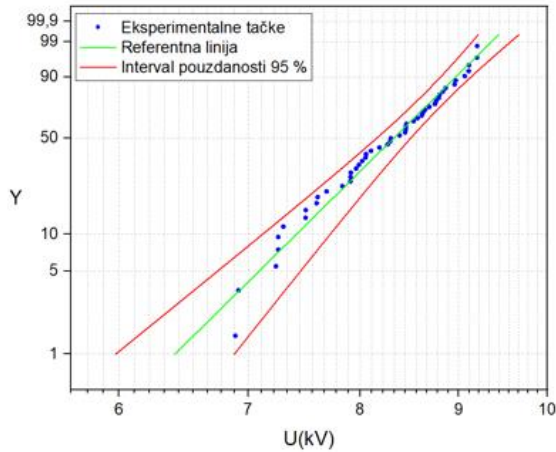


c)

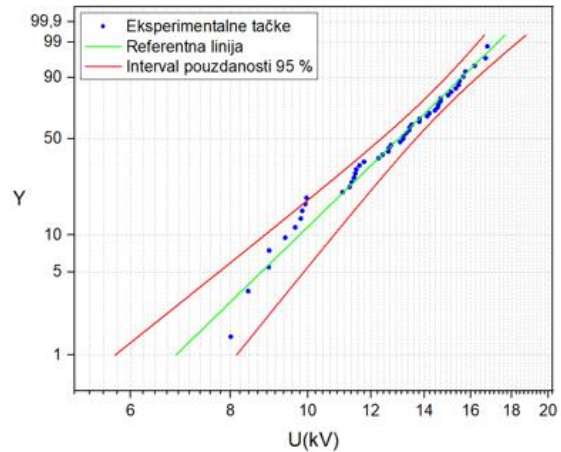


d)

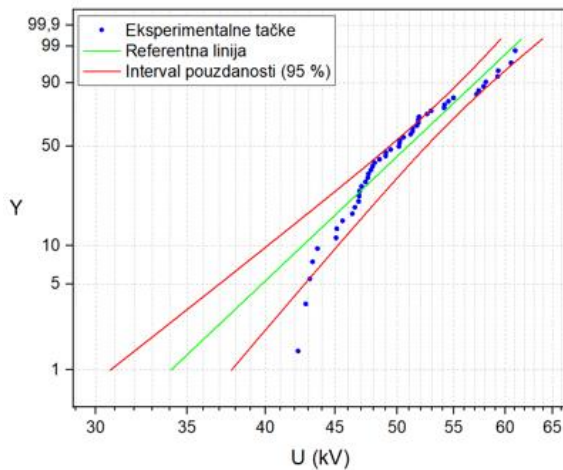
Sl. 9.13 Weibulov papir verovatnoće za PDIV; a) N_{2S} zona I; b) N_{2N} zona II; c) N_{MS} zona II; d) N_{MN} zona II



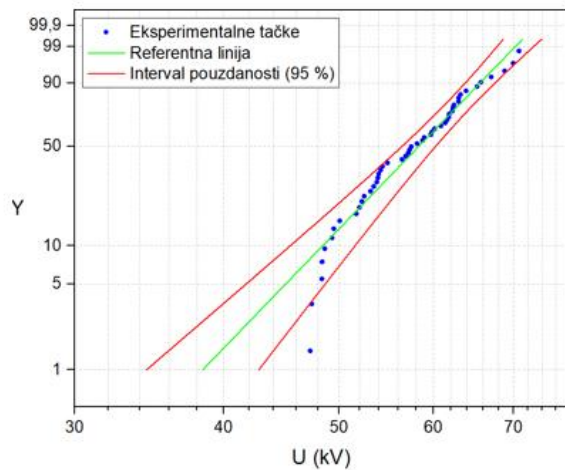
a)



b)



c)

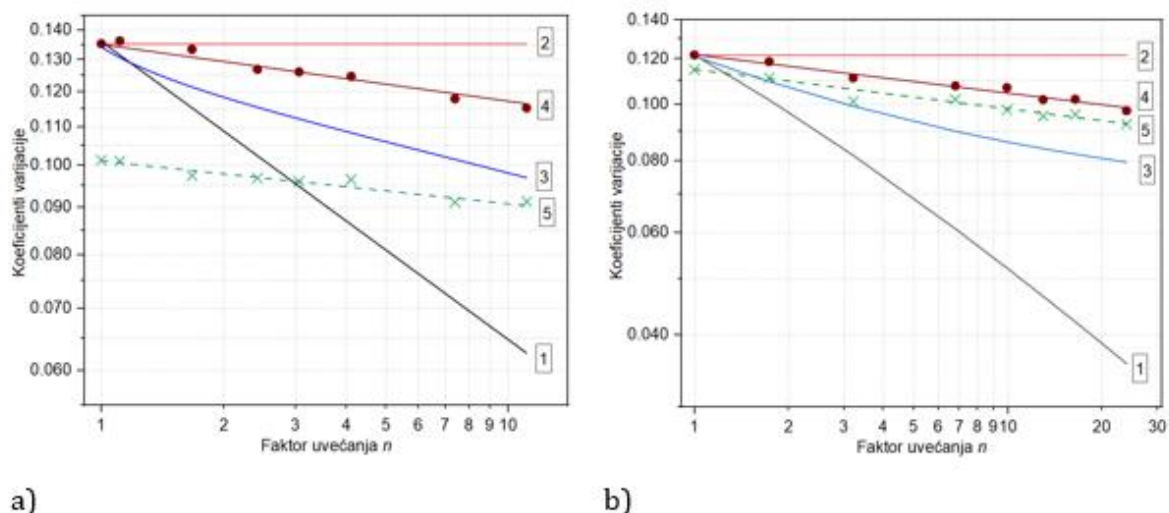


d)

Sl. 9.14 Vejbulov papir verovatnoće za VBD; a) N_{2S} zona I; b) N_{2N} zona III; c) N_{MS} zona III; d) N_{MN} zona III

Da bismo proverili izjavu o primenljivosti izraza (7.16) i (7.25) o povećanju verovatnoće električnog pražnjenja izolacije namotaja statora električne obrtne mašine, potrebno je proveriti da li posmatrane slučajne veličine pripadaju istoj statističkoj raspodeli za osnovni uzorak ($n=1$ za koji je utvrđeno da pripada troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli). Ova verifikacija je napravljena upoređivanjem eksperimentalno dobijenih tačaka koeficijenta varijacije u zavisnosti od faktora uvećanja i teorijske krive dobijene na osnovu pretpostavljenih statističkih raspodela.

Na Sl. 9.15 je prikazana zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih vrednosti koeficijenta varijacije za slučajne veličine PDIV i VBD u zavisnosti faktora uvećanja za nove i korišćene dvoslojne i višeslojne uzorke. Uočene slučajne veličine su merene na novim i korišćenim uzorcima u vazduhu.



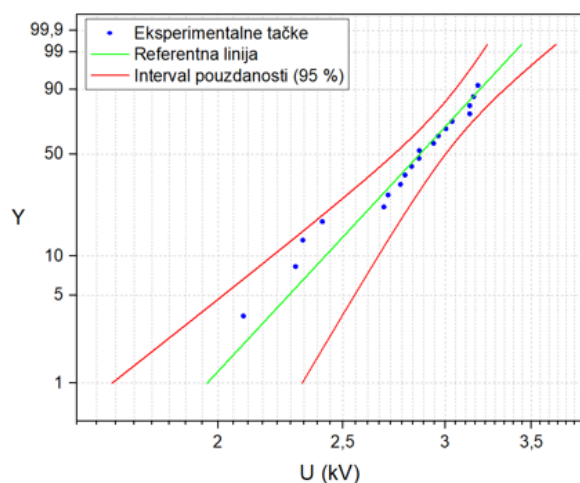
Sl. 9.15 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na faktor uvećanja za slučajnu promenljivu: a) PDIV dvoslojni uzorak, zona II; b) VBD, višeslojni uzorak, zona III; (1) – Eksponecijalna raspodela; (2) – Dvoparametarska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparametarska Vejbulova raspodela –●– nov uzorak; (5) – Troparametarska Vejbulova raspodela; x – - - - korišćeni uzorak

Na osnovu ilustracije na Sl. 9.15 može se pouzdano reći da su izmerene slučajne veličine osnovnih uzoraka i skaliranih uzoraka povezani sa troparametarskom Vejbulovom raspodelom, tako da izrazi zakona o povećanju verovatnoće se mogu primeniti jer su izvedeni pod takvom pretpostavkom.

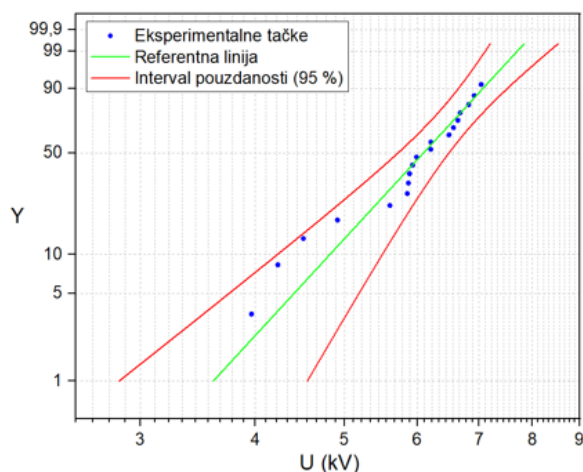
Odgovarajući statistički uzorci formirani su merenjem slučajnih veličina PDIV i VBD na novim namotajima (kanurama) i namotajima starim deset godina. Kao i u slučaju uzoraka formiranih od delova namotaja prvo je primenjen modifikovani Šoveneov kriterijum za odbacivanje sumnjivog merenja. Zatim, da bi se potvrdio statistički identitet, vršilo se ispitivanje ugla gubitaka i primenjen je U test (2×10 poduzoraka).

Iz istih razloga, kao u slučaju ispitivanja na manjim uzorcima, eksperimentalno dobijene slučajne veličine PDIV i VBD novih i korišćenih namotaja se ispituje na pripadnost na normalnu raspodelu i raspodelu po ekstremnim vrednostima.

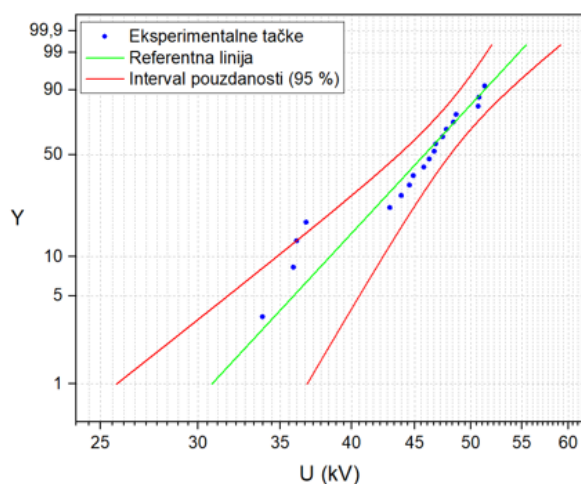
Na osnovu slučajnih veličina PDIV i VBD grafičkim testiranjem utvrđeno je da pripadaju dvostrukoj komponenti Vejbulove troparametarske raspodele aditivnog tipa, Sl. 9.16.



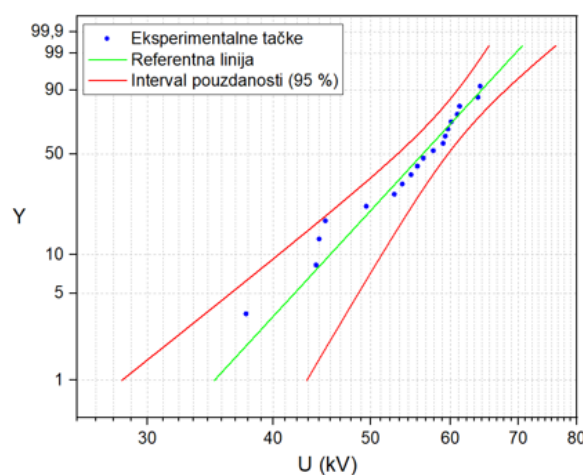
a)



b)



c)



d)

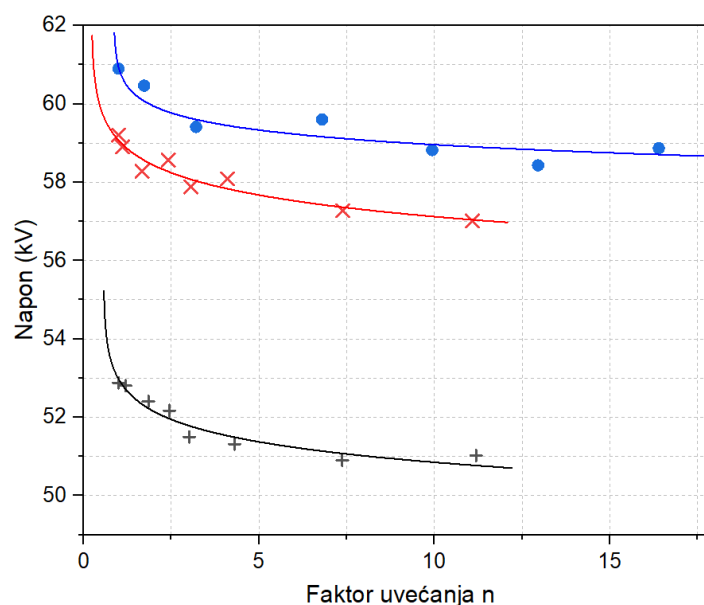
Sl. 9.16 Weibulov papir verovatnoće za ceo namotaj; a) PDIV K_{CS} ; b) PDIV K_{CN} ; c) VBD K_{CS} ; d) VBD K_{CN}

Na Sl. 9.17 su prikazane zavisnosti srednjeg napona proboja u odnosu na faktor uvećanja (eksperimentalno dobijene tačke i fitovane krive na osnovu izraza (7.21) za N_{MN}). Može se primetiti da Zona III ima najviši probojni napon, a potom slede zona II i zona I, što je i očekivano obzirom na tehnologiju izrade namotaja.

Prilikom utvrđivanja statističkog uzorka slučajnih promenljivih za PDIV i VBD za ceo namotaj, postoji izvestan broj slučajnih uzoraka koji pripadaju nižim vrednostima rezultujuće kompleksne raspodele aditivnog tipa. Razlog ovome je što su vrednosti slučajnih veličina PDIV i VBD, Sl. 9.17, niže u delu namotaja Zona I i II (kao posledica tehnološkog procesa proizvodnje namotaja), što rezultira najvećim brojem električnih pražnjenja koja se javljaju u zoni I i II. Ovu pretpostavku potvrđuje fotografija jednog probijenog namotaja za koje je vizuelnim pregledom utvrđeno da je do kvara došlo u zoni II, Sl. 9.18. Zona II predstavlja najkritičniji deo namotaja kada se on ispituje kao ceo namotaj prema uzemljenoj elektrodi (aluminijumska folija na Sl. 9.18). Razlog za to je preklapanje slaboprovodnog i poluprovodnog premaza na površini kanure. Tokom rada

mašine ovaj deo namotaja je izložen dodatnim naprezanjima izazvanim aksijalnim magnetnim poljem statora. Kad se radi o uzorcima sa višeslojnom izolacijom kritične vrednosti praga parcijalnih pražnjenja i probojnog napona imaju uzorci formirani iz zone I (glave kanure) zbog procesa formiranja kanure sa duplim savijanjem.

Može se zaključiti da manja statistička greška nastaje kada se slučajne promenljive PDIV i VBD smatraju jedinstvenom raspodelom.



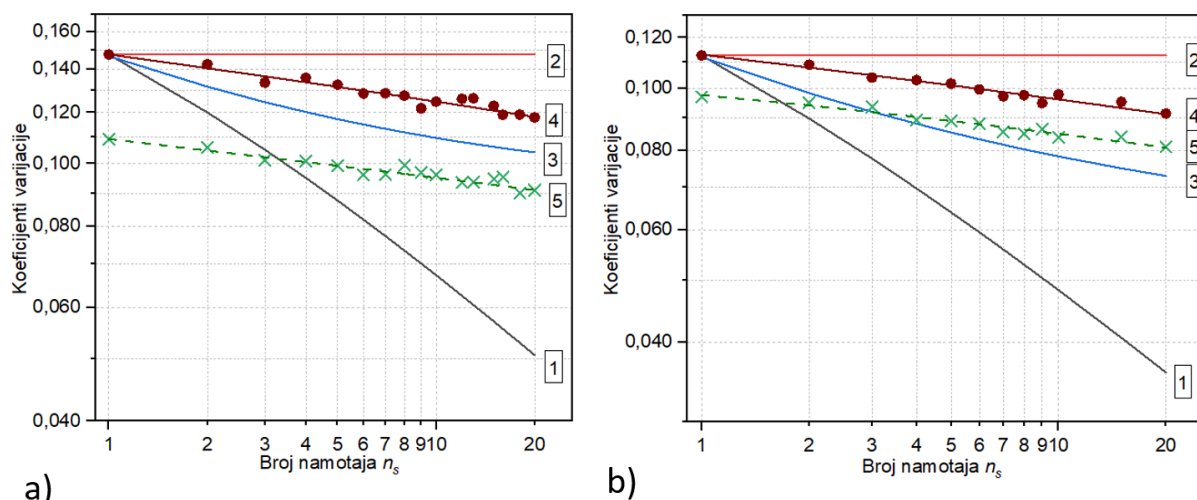
Sl. 9.17 Zavisnost srednje vrednosti probojnog napona od faktora uvećanja za N_{MN} - eksperimentalno dobijene tačke i fitovane krive na osnovu izraza (7.21); (1) + - Zona I, (2) x - Zona II (3) ● - Zona III



Sl. 9.18 Slika probijenog novog namotaja u zoni II

Sl. 9.19 prikazuje zavisnost faktora varijacije za slučajne uzorke PDIV i VBD u odnosu na broj novih i korišćenih namotaja.

Na osnovu Sl. 9.19 može se pouzdano reći da slučajne promenljive PDIV i VBD namotaja odgovaraju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli, tako da mogu se primeniti izrazi zakona o povećanju verovatnoće, jer su izvedeni pod takvom pretpostavkom.

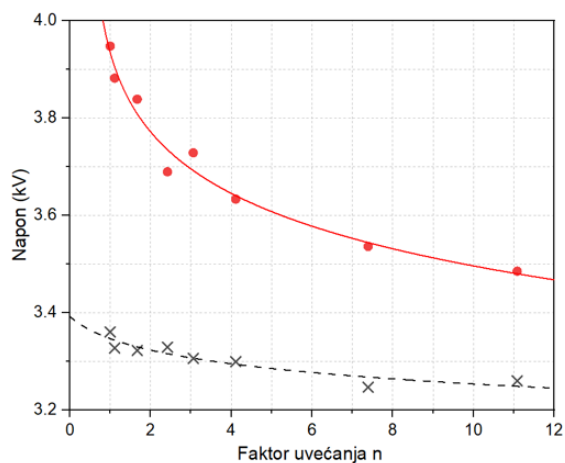


Sl. 9.19 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na broj namotaja za slučajnu promenljivu: a) „napon praga parcijalnih pražnjenja”, ceo namotaj b) „napon proboja”, ceo namotaj; (1) – Eksponencijalna raspodela; (2) – Dvoparametarska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparametarska Vejbulova raspodela: —●— nov uzorak; (5) Troparametarska Vejbulova raspodela - x - - - korišćeni uzorak

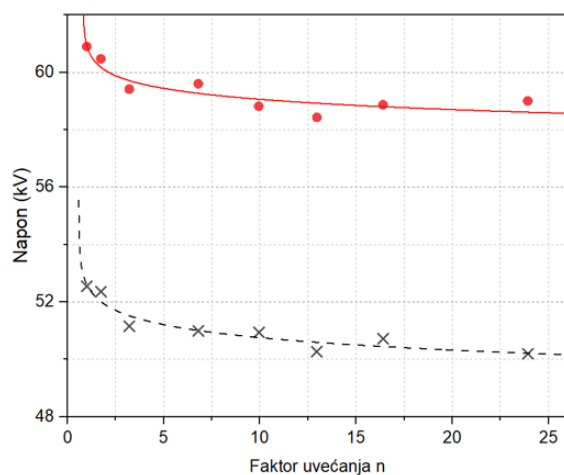
Za procenu β Vejbulove raspodele korišćeno je više metoda koje su već pomenute u radu. Upoređivanjem vrednosti parametra β za različite metode dobija se razlika od nekih 7 – 9 % zavisno da li se radi o novom ili korišćenom uzorku. Tako dobra saglasnost parametra β dobijenog različitim metodama odobrava primenljivost zakona porasta verovatnoće na status izolacije.

Na Sl. 9.20 prikazane su zavisnosti srednje vrednosti napona u odnosu na faktor uvećanja za PDIV dvoslojni uzorak iz zone II (a) i VBD za višeslojni uzorak iz zone III (b), određene izrazom (7.21) uz upotrebu Vejbulovog parametra β dobijenog fitovanjem.

Na Sl. 9.21 data je zavisnost slučajne promenljive PDIV i VBD i standardne devijacije računane na osnovu izraza 7.20 u odnosu na porast broja namotaja za korišćene i nove namotaje. Izvršeno je odbacivanje sumnjivog merenja, tj. niskonaponske aditivne komponente napona.

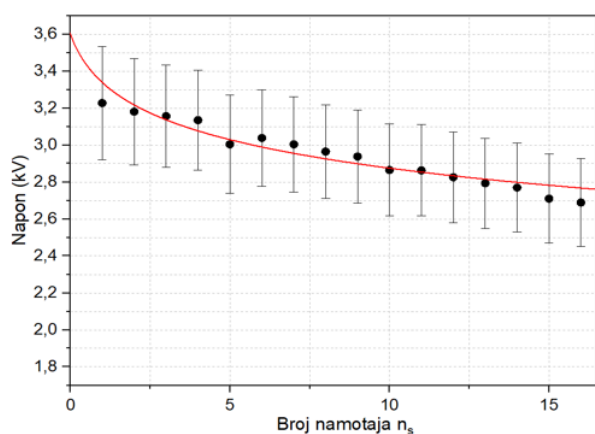


a)

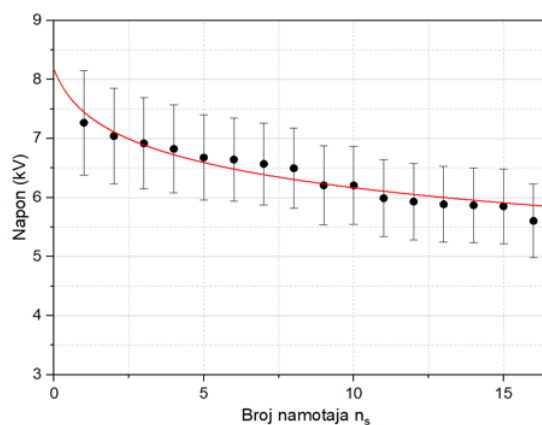


b)

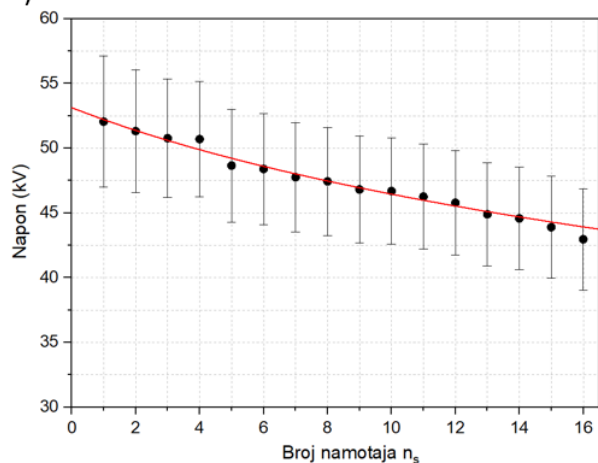
Sl. 9.20 Zavisnost srednje vrednosti napona u odnosu na faktor uvećanja za a) PDIV dvojslojni uzorak iz zone II; b) VBD višeslojni uzorak iz zone III; —●— nov uzorak; x - - - - korišćeni uzorak



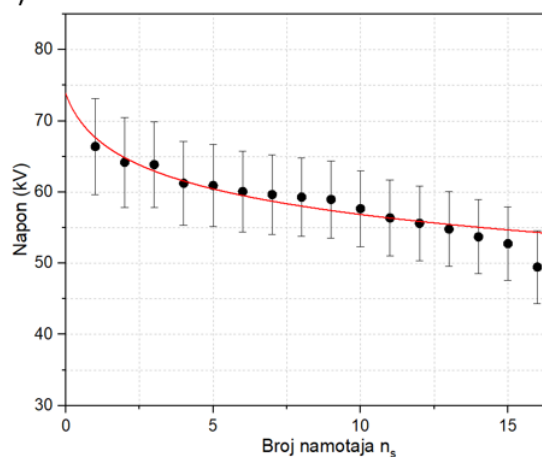
a)



b)



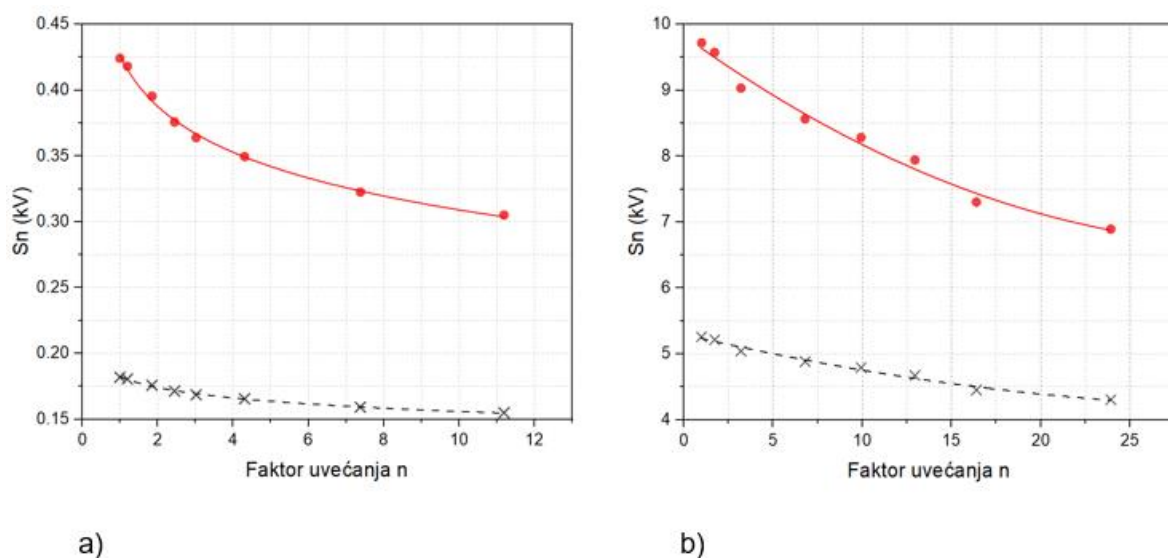
c)



d)

Sl. 9.21 Zavisnost srednje vrednosti napona u odnosu na broj namotaja za a) PDIV K_{cs} ; b) PDIV K_{CN} ; c) VBD K_{cs} ; d) VBD K_{CN}

Na Sl. 9.22 su prikazane zavisnosti standardne devijacije u odnosu na faktor uvećanja za PDIV dvoslojni uzorak iz zone II (a) i VBD za višeslojni uzorak iz zone III (b), određene izrazom (7.20) uz upotrebu Vejbulovog parametra β dobijenog fitovanjem.

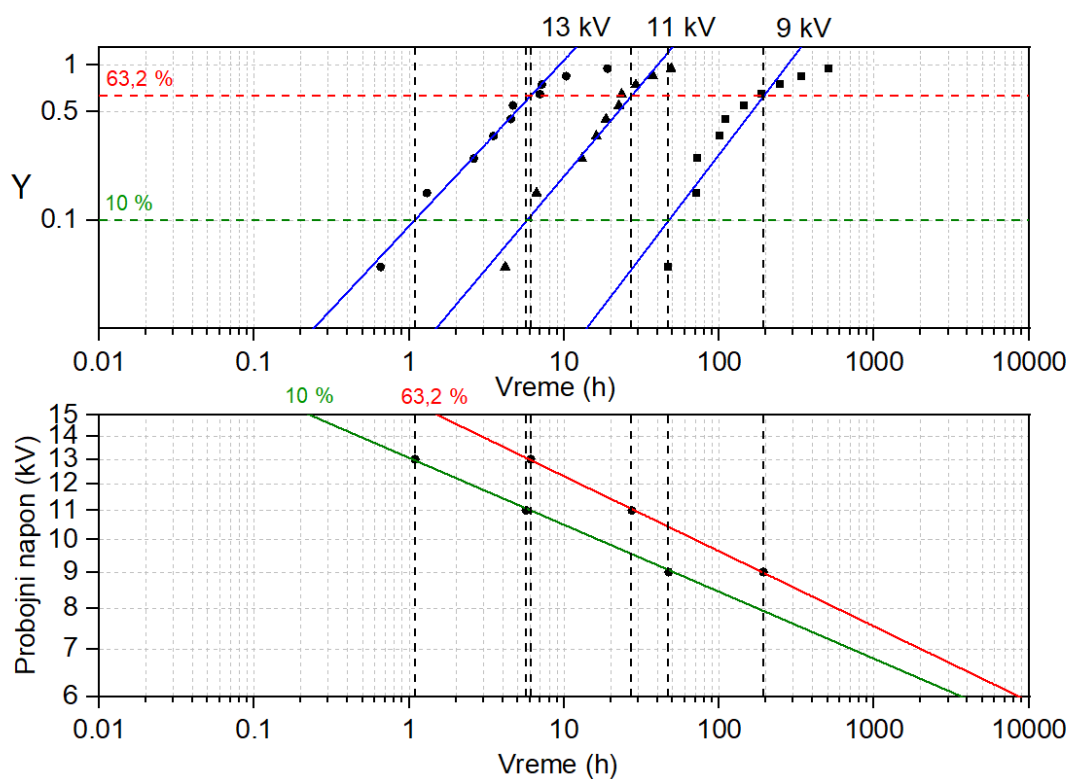


Sl. 9.22 Zavisnost vrednosti standardne devijacije u odnosu na faktor uvećanja a) PDIV dvoslojni uzorak iz zone I; b) VBD višeslojni uzorak iz zone III; —●— novi uzorak; x - - - - korišćeni uzorak

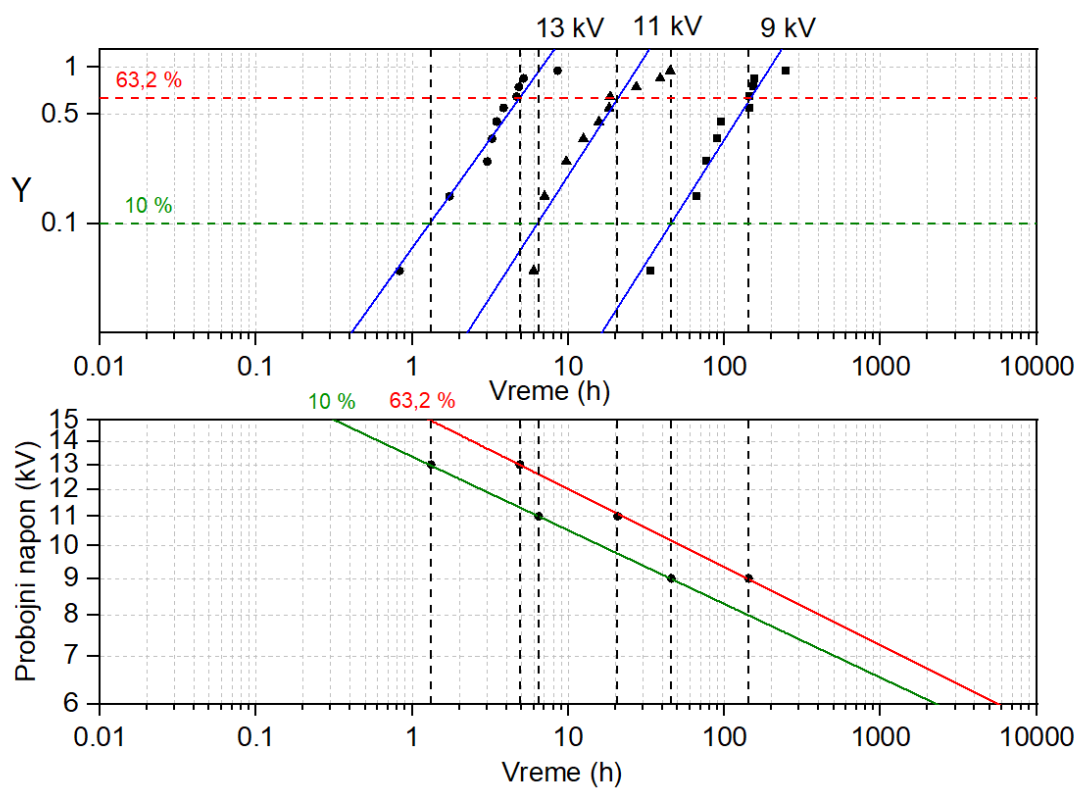
Na osnovu prethodnih razmatranja, uočeno je dobro slaganje između eksperimentalnih rezultata i izvedenih teorijskih očekivanja iz zakona o povećanju verovatnoće električnog pražnjenja.

9.3.2. Preostali životni vek za obrtno mašine

Na Sl. 9.23 i Sl. 9.24 je prikazano određivanje životnih karakteristika za nove i korišćene statorske kanure, respektivno. U Tab. 9.3 su date vrednosti koeficijenta životnog veka r za nove i korišćene kanure, za 63,2 % i 10 % kvantile. Može se videti da su vrednosti koeficijenata životnog veka za oba kvantila za nove uzorke manji od koeficijenata za korišćene uzorke, što je i očekivano. Relativno bliska vrednost između novog i korišćenog uzorka za 63,2 % kvantil svedoči da izolacioni sistem obrtno mašine (motora) nije bio izložen velikim naprezanjima i stresovima (prenaponi, česta pokretanja). Uvidom u tehničku dokumentaciju eksploataisanog motora verifikovana je prethodna tvrdnja. Naime, elektromotor nije dugo bio u eksploataciji, pri čemu je puštanje u rad vršeno preko autotransformatora a ne direktno.



Sl. 9.23. Određivanje karakteristike životnog veka za ispitivanje pri konstantnom naponu za nove uzorke kanura



Sl. 9.24. Određivanje karakteristike životnog veka za ispitivanje pri konstantnom naponu za korišćene uzorke kanura

Tab. 9.3. Koeficijenti životnog veka za korišćene i nove uzorke

r	korišćeni uzorak	novi uzorak
63,2 % kvantil	9,13	9,43
10 % kvantil	9,68	10,55

9.4. Uzorci za ispitivanje izolacionog sistema kablova

Kod izolacionih kablova su vršene analize važenja zakona porasta verovatnoće ishoda i zakona za određivanje preostalog životnog veka. Za zakon porasta korišćen je porast broja kablova (uzoraka) koji se podvrgavaju eksperimentu sa ishodima napona praga parcijalnih pražnjenja (PDIV) i probojnog napona (VBD). Isti uzorci su korišćeni i za dokazivanje zakonitosti preostalog životnog veka. Pri tome se, u skladu sa prethodnim analizama, životni vek izolacionog sistema kablova posmatra dominantno kao elektrohemijski proces dugog trajanja.

Kao što je rečeno, uzorci visokonaponskih kablova su gotovi originalni trožilni kablovi sa završnicama koji služe kao spojni kablovi u sredjenaponskim postrojenjima. Tip kabla je IPO 13 3x240 mm², 10 kV. Ispitivanja su vršena na setovima trožilnih kablova 12 X 2 korištenih (koji su u eksploataciji bili 20 godina) i 12 X 2 novih trožilnih kablova, pri čemu je ispitivana jedna žila prema ostalim dvema žilama združenim sa uzemljenjem (u skladu sa standardima). Svaki uzorak je dugačak 3,5 metra, sa kablovskim glavama na oba kraja.

Ispitivanja zakona porasta verovatnoće ishoda PDIV parcijalnih pražnjenja su nedestruktivna, odnosno uzorci se mogu ponovo koristiti, na primer za destruktivna ispitivanja zakona porasta verovatnoće ishoda za VBD.

Za ispitivanje zakonitosti preostalog životnog veka pomenuti broj novih i korištenih kablova, kao što je naznačeno, je podeljen u dve (pod)grupe od po 12 uzoraka. Prva grupa je ispitivana „step naponom“ sa trajanjem koraka od jednog minuta a druga grupa sa trajanjem koraka od 15 minuta. Odnos napona između susednih koraka je izabran $q=1,03$. Početni ispitni napon za korišćene uzorke kablova je izabran 30 kV a za nove 45 kV. Brzina podizanja napona između dva koraka je 120 kV/min, što se za ovaj eksperiment može smatrati trenutno, tj ne utiče na kumulativno vreme ispitivanja.

Na Sl. 9.25 dati su uzorci nekih korištenih kablova.



Sl. 9.25 Uzorci korišćenih kablova

9.5. Rezultati ispitivanja i analiza za kablove

9.5.1. Zakon porasta verovatnoće i modeli

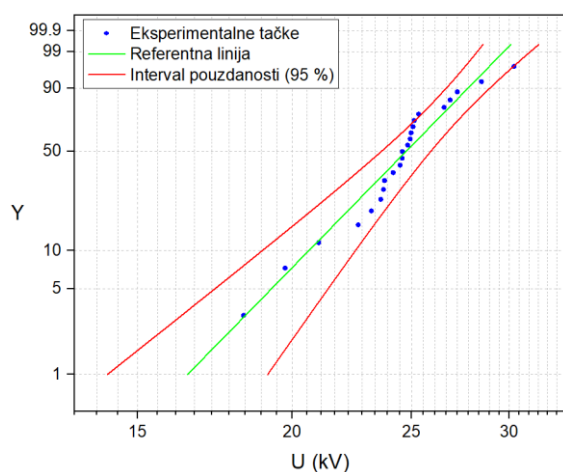
Slučajne promenljive (veliĉine) koje su ispitivane za zakon porasta verovatnoće ishoda su prag napona parcijalnih praĉnjenja (PDIV) i probojni napon (VBD). Konzistentnost skupa eksperimentalnih rezultata odnosno njihova pripadnost istoj raspodeli utvrđivana je grafiĉkim testom. Rezultati grafiĉkih testova verifikovani su χ^2 testom i Kolmogorovim testom. Da bi se odredila statistiĉka raspodela eksperimentalno dobijenih rezultata sluĉajne promenljive, rezultati su bili ispitivnai na pripadnost normalnoj raspodeli, zatim troparametarskoj i dvoparametarskoj Vejbulovoj raspodeli kao i eksponencijalnoj raspodeli. Na osnovu datih ispitivanja zakljuĉeno je da sve sluĉajne promenljive pripadaju troparametarskoj Vejbulovoj raspodeli.

Na osnovu više skupova eksperimentalnih podataka utvrđivani su parametri Vejbulove raspodele za pojedine sluĉajne promenljive: I) PDIV za nove, II) PDIV za korišćene, III) VBD za korišćene (1min), IV) VBD za korišćene (15min), V) VBD za nove (1min), VI) VBD za nove (15min) uzorke kablova. Podaci su prikazani u Tab. 9.4.

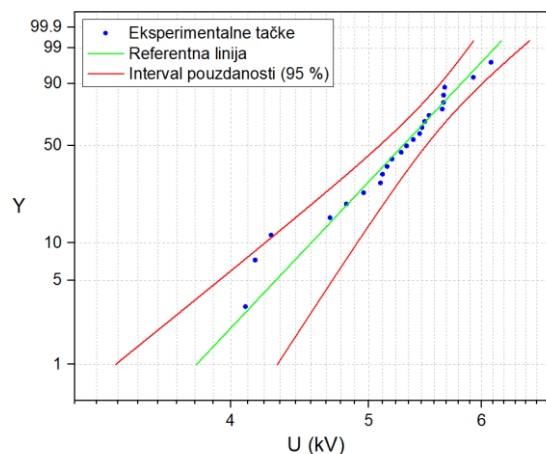
Tab. 9.4. Parametri Vejbulove raspodele za različite skupove slučajnih promenljivih

	Oznaka raspodele	Uzorci	Parametar β	Parametar U_a	Parametar η
I	Wpd k	korišćeni	12,72	3,45	5,43
II	Wpd n	novi	10,38	15,06	26,62
III	Wbd k1	korišćeni, 1 min	14,26	36,28	52,69
IV	Wbd k15	korišćeni, 15 min	14,69	35,11	48,22
V	Wbd n1	novi, 1 min	11,18	56,68	76,70
VI	Wbd n15	novi, 15 min	11,27	47,42	67,00

Na Sl. 9.26 su prikazani Vejbulovi papiri verovatnoće za nove i korišćene uzorke kablova za slučajnu promenljivu PDIV. Na Sl. 9.27 su prikazani Vejbulovi papiri verovatnoće za nove i korišćene uzorke kablova za slučajnu promenljivu VBD, sa vremenom trajanja koraka od 1 min i 15 min.

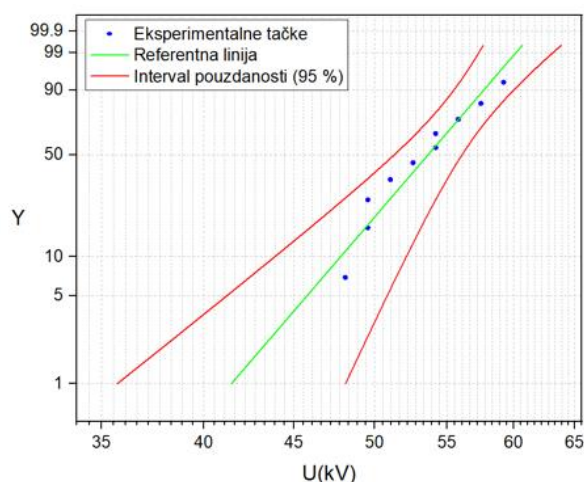


a)

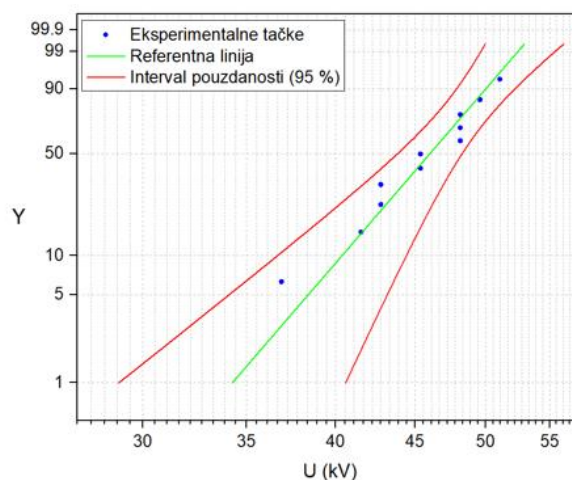


b)

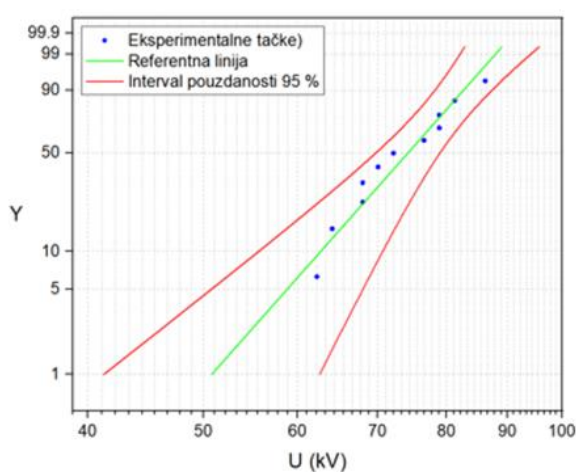
Sl. 9.26 Vejbulovi Vejbulovi papiri verovatnoće za PDIV; a) novi uzorci; b) korišćeni uzorci



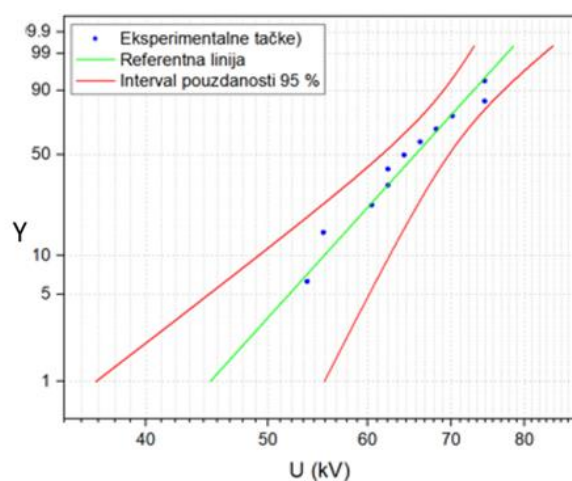
a)



b)



c)

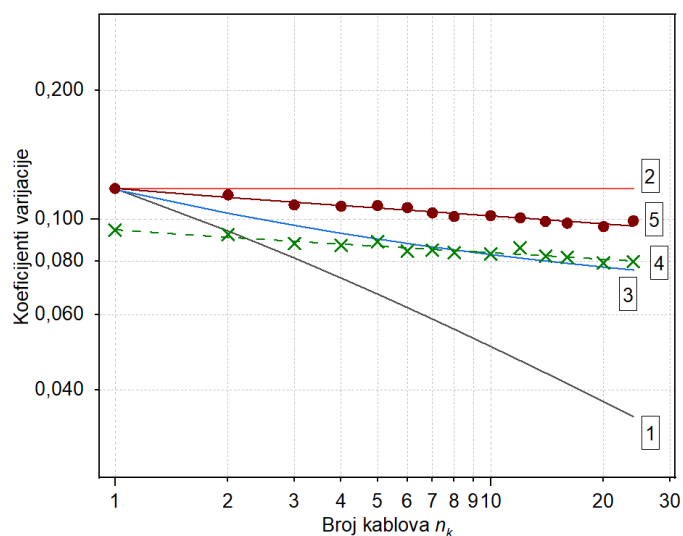


d)

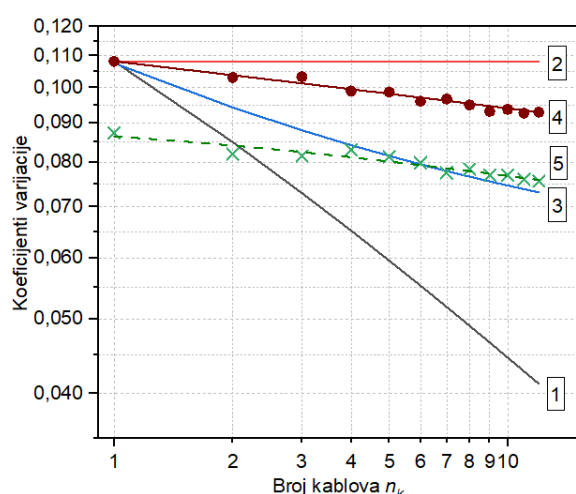
Sl. 9.27 Weibulovi papiri verovatnoće za VBD; a) korišćeni uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 1 min; b) korišćeni uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 15 min; c) novi uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 1 min; d) novi uzorci, trajanje ispitivanja koraka – 15 min

Kao i u slučaju obrtnih mašina da bismo proverili izjavu o primenljivosti izraza (7.16) i (7.25) o povećanju verovatnoće električnog pražnjenja izolacije srednjenaponskog kabla, verifikacija je izvršena upoređivanjem eksperimentalno dobijenih tačaka koeficijenta varijacije u zavisnosti od broja kablova (uzoraka) i teorijske krive dobijene na osnovu pretpostavljenih statističkih raspodela (Sl. 9.28 i Sl. 9.29).

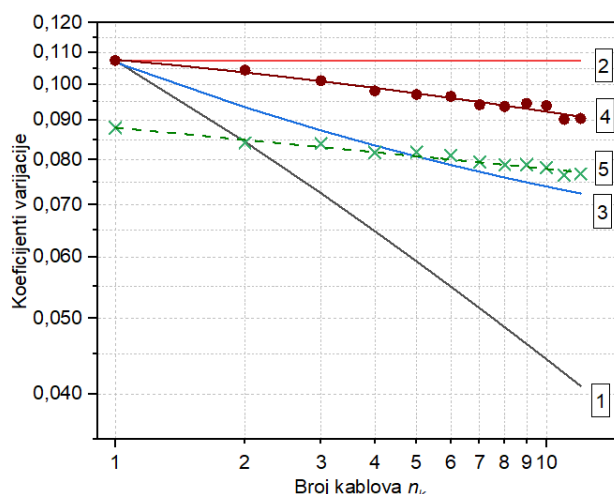
Na osnovu Sl. 9.28 i Sl. 9.29 može se pouzdano reći da su izmerene slučajne veličine osnovnih uzoraka i skaliranih uzoraka povezani sa troparametarskom Weibulovom raspodelom, tako da izrazi zakona o povećanju verovatnoće se mogu primeniti jer su izvedeni pod takvom pretpostavkom.



Sl. 9.28 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na broj kablova za slučajnu promenljivu PDIV; za novi uzorak (1) – Eksponecijalna raspodela; (2) – Dvoparametarska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparametarska Vejbulova raspodela: —●— nov uzorak; (5) Troparametarska Vejbulova raspodela - x - - - - - korišćeni uzorak



a)

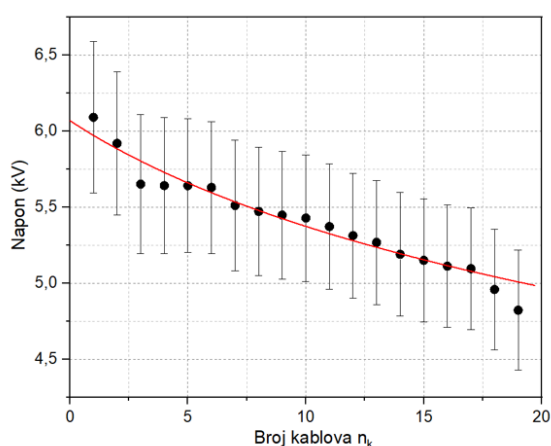


b)

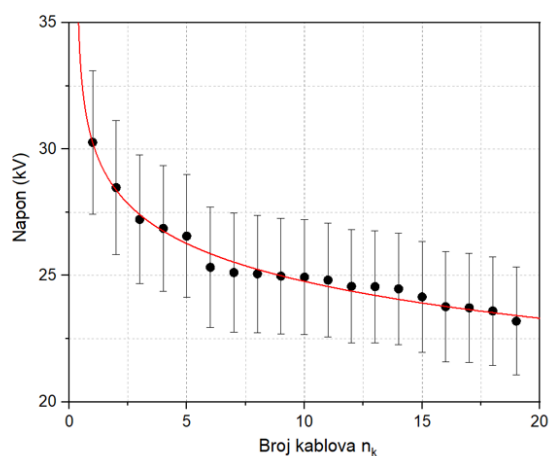
Sl. 9.29 Zavisnost eksperimentalno i teorijski dobijenih koeficijenata varijacije u odnosu na broj kablova za slučajnu promenljivu VBD: a) vreme trajanja koraka 1 min; b) vreme trajanja koraka 15 min; (1) – Eksponecijalna raspodela; (2) – Dvoparametarska Vejbulova raspodela; (3) – Normalna raspodela; (4) – Troparametarska Vejbulova raspodela: —●— nov uzorak; (5) Troparametarska Vejbulova raspodela - x - - - - - korišćeni uzorak

Na Sl. 9.30 data je zavisnost slučajne promenljive PDIV u odnosu na porast broja kablova za korišćene i nove kablove. Na Sl. 9.31 data je zavisnost vrednosti slučajne promenljive VBD u odnosu na porast broja kablova za korišćen i nov kabl za vremena trajanja koraka od 1 min i 15 min. Na obe slike prikazana je i standardna devijacija računata na osnovu

izraza 7.20. Takođe, izvršeno je odbacivanje sumnjivog merenja, tj. niskonaponske aditivne komponente pošto se većina proboja na nižim naponima desila u kablovskoj završnici, koja predstavlja najkritične mesto na kablu (zajedno sa kablovskom spojnicom).

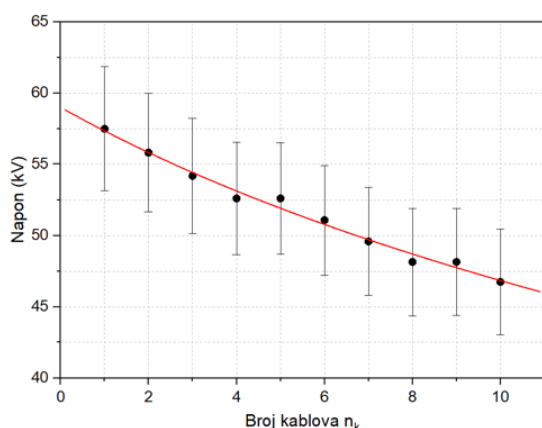


a)

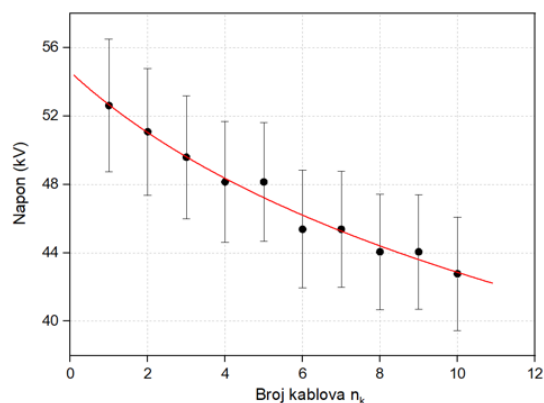


b)

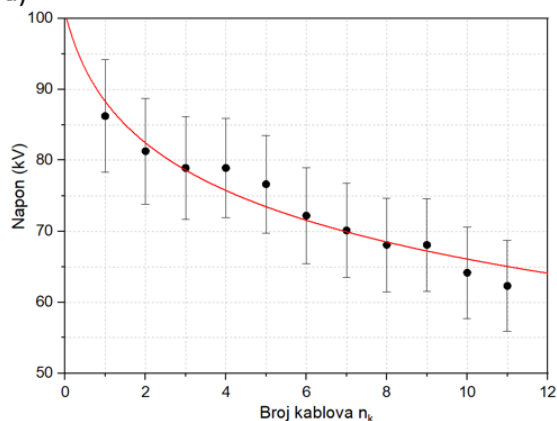
Sl. 9.30 Zavisnost slučajne promenljive PDIV u odnosu na broj kablova; a) korišćen kabl; b) nov kabl



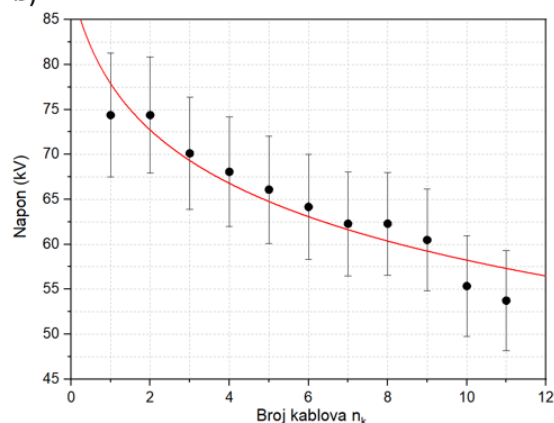
a)



b)



c)



d)

Sl. 9.31 Zavisnost vrednosti slučajne promenljive (VBD) u odnosu na broj kablova; za korišćen kabl, a) vreme trajanja koraka 1 min; b) vreme trajanja koraka 15 min; za nov kabl c) vreme trajanja koraka 1 min; d) vreme trajanja koraka 15 min;

9.5.2. Preostali životni vek za kablove

Rezultati ispitivanja za nove i korišćene uzorke kablova su prikazani u Tab. 9.5 i Tab. 9.6, respektivno. Rezultati obuhvataju po dva eksperimenta koji se razlikuju po brzini i načinu podizanja napona, u koracima po 1 minut ($U_{1 \text{ min}}$) ili po 15 minuta ($U_{15 \text{ min}}$), čime se postižu različita vremena ubrzanog starenja odnosno ubrzanog ispitivanja preostalog životnog veka. Vremena se prate preko veličina „broja koraka“, p_1 (za 1 mim), p_2 (za 15 mim).

Veličine koje se mere tokom eksperimenta su slučajna promenljiva „probojni napon“ odnosno VBD i vreme do ishoda, tj do događaja proboja. Dostignuti napon neposredno pre proboja predstavlja dielektričnu čvrstoću izolacionog sistema pod datim uslovima a vreme do proboja predstavlja „kraj životnog veka“ tretiranog uzorka. Pad dielektrične čvrstoće izolacionog sistema kabla ispod zahtevane granice, u uslovima eksploatacije, je kraj životnog veka za posmatrani kabl. To znači da starenje predstavlja postepeni gubitak dielektrične čvrstoće sistema od utvrđenih vrednosti pod datim uslovima do konačne minimalne čvrstoće. Eksperiment utvrđuje dielektričnu čvrstoću u dva različita vremena, sa idejom da se rezultati mogu ekstrapolirati na znatno duži vremenski period.

Mora da važi pretpostavka da tokom eksperimenta nije došlo do promene mahanizama starenja. To se utvrđuje ispitivanjem pripadnosti rezultata istoj raspodeli (U test i drugi).

Iz eksperimentalnih podataka, obradom rezultata prema poglavlju 8.6, dobija se eksponent starenja r za date uslove ispitivanja. Na osnovu jednačine 8.2 izračunava se kriva starenja, tj prava, sa nagibom $k = -\frac{1}{r}$. Jasno je da će nagib biti veći ukoliko je eksponent r manji, odnosno starenje će biti brže.

Tab. 9.5. Prikaz rezultata ispitivanja za nove uzorke kablova

Uzorak broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U 1 min	57	62,29	64,16	68,07	68,07	70,11	72,21	76,61	78,91	78,91	81,27	86,22
U 15 min	47,74	53,73	55,34	60,48	62,29	62,29	64,16	66,08	68,07	70,11	74,38	74,38
p_1	7,25	11,75	12,42	14,17	14,92	15,17	16,42	18,08	19,42	18,58	20,67	22,33
p_2	3,2	6,53	7,53	10,33	11,4	11,27	12,13	13,33	15	15,8	16,07	16,27
$p_1 - p_2$	4,05	5,22	4,88	3,83	3,52	3,9	4,28	4,75	4,42	2,78	4,6	6,07
r	22,62	17,56	18,76	23,9	26,05	23,49	21,39	19,29	20,74	32,92	19,92	15,1

Tab. 9.6. Prikaz rezultata ispitivanja za korišćene uzorke kablova

Uzorak broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U 1 min	39,14	44,05	48,14	49,58	49,58	51,07	52,6	54,18	54,18	55,81	57,48	59,21
U 15 min	35,82	36,89	41,53	42,77	42,77	45,37	45,37	48,14	48,14	48,14	49,58	51,07
p_1	9,75	13,67	16,42	17,92	18,67	18,83	19,75	20,58	20,92	21,33	22,83	23,75
p_2	6,13	7,13	11,27	12,2	12,13	14,6	14,53	16,4	16,6	16,13	17,47	18,07
$p_1 - p_2$	3,62	6,53	5,15	5,72	6,53	4,23	5,22	4,18	4,32	5,2	5,37	5,68
r	25,33	14,02	17,79	16,03	14,02	21,64	17,56	21,9	21,22	17,62	17,07	16,12

Srednja vrednost koeficijenta r za nove uzorke kablova iznosi 21,81, dok je za korišćene 18,36, pri čemu je vrednost koeficijenta r za korišćeni uzorak broj 1 odbačena kao sumnjivo merenje. Može se zaključiti je koeficijent životnog veka za nove kablove veći od koeficijenta za korišćene kablove, što je i očekivano.

10. Zaključak

Predmet istraživanja u okviru disertacije je predikcija stanja izolacionih sistema visokonaponske (VN) elektroenergetske opreme. U tu svrhu se istražuju mogućnosti primene zakona porasta verovatnoće ishoda kao i zakonitosti starenja na date visokonaponske izolacione sisteme (obrtne mašine i kablovi). Data tema je aktuelna i u skladu je sa savremenim trendovima povećanja efikasnosti visokonaponske tehnike kroz povećanje gustine snage po jedinici mase i zapremine, što dovodi do povećanja napona i smanjenja gabarita kod VN jedinica. I pored nametnutih restrikcija zahteva se podizanje pouzdanosti i raspoloživosti, produženje životnog veka i konačno povećanje ekonomičnosti (projektovanje, proizvodnja, eksploatacija, održavanje).

Postavljeni problem je izrazito multidisciplinaran (teorijski, eksperimentalno, empirijski, matematički i softverski). Stoga je proučena brojna literatura kako bi se sagledala šira slika problema, od čega je jedan deo refereni citiran. Istraživanje je zasnovano formiranjem odgovarajućih teorijskih modela kao i odgovarajućih fizičkih (eksperimentalnih) i matematičko-statističkih modela.

Modelovanje se odnosi na utvrđivanje važenja zakona porasta verovatnoće nekog ishoda za model n puta umanjen u odnosu na realni objekat, u smislu umanjenja površine (dimenzija), manjeg broja elemenata i dr. Utvrđivanje (preostalog) životnog veka se zasniva na statističkim analizama rezultata eksperimentalnih ispitivanja i dostupnih podataka iz eksploatacije.

Eksperimentalni postupak sproveden je pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Fizički modeli i uzorci su reprezentativnog karaktera za module (delove) visokonaponske izolacije kod visokonaponskih obrtnih mašina i kablovskih sistema. Sve metode ispitivanja su vršene u skladu sa važećim relevantnim standardima. Empirijski postupak istraživanja je sproveden na eksploatacionim podacima dostupnim iz literature, baza podataka, ekspertiza i studija slučaja. Svi dobijeni podaci su analizirani i obrađeni matematičko-statističkim postupcima. Obradom rezultata došlo se do zajedničkih grupnih parametara koji karakterišu neke osobenosti izolacionog sistema saglasno zakonu porasta verovatnoće za posmatanu veličinu. Nakon izvršenih istraživanja svi rezultati su podvrgnuti ekspertizi i tumačenju naučno-stručnim metodama.

Statistička obrada rezultata je počinjala ispitivanje pripadnosti ispitivanih uzoraka jednog tipa jedinstvenom statističkom uzorku pomoću razvijenog numeričkog algoritma. Zatim su rezultati obrađivani pomoću razvijenih algoritama za utvrđivanje parametara statističkih raspodela kod primene zakona porasta verovatnoće ishoda na skaliranim modelima izolacionog sistema kao i za procenu (preostalog) životnog veka što rezultira složenom predikcijom stanja realnih izolacionih sistema.

Najznačajniji naučni doprinosi koju su ostvareni u okviru doktorske disertacije ogledaju se u sledećem:

Prvi cilj rada je da se utvrdi mogućnost predikcije karakteristika izolacionog sistema VN objekta na osnovu karakteristika modela (značajno manjih od realnog objekta) primenom zakona porasta verovatnoće ishoda izabranih veličina (PDIV, VBD). Istraživanja su potvrdila postavljenu hipotezu da je moguće formirati modele izolacionog sistema, u skladu sa zakonom porasta verovatnoće, koji reprezentuju relevantne dielektrične karakteristike EIS realnog objekta. Pokazano je da model treba da reprezentuje izolaciono najslabiji deo EIS jer on dominantno određuje njegov projektovani kvalitet.

Izvršena je analiza dominantnih procesa starenja i postavljeni su algoritmi i statističke metode za procenu preostalog veka trajanja EIS. Prilikom istraživanja bilo je neophodno da se izvrše određene aproksimacije na stranu sigurnosti. Naime, faktori starenja odnosno način uticaja na stanje elektroizolacionog sistema VN objekata su brojni i u jednom delu se mogu posmatrati u odvojenim (aditivnim) uticajima ali je njihovo sinergističko delovanje najuticajnije na ubrzano starenje. Na osnovu statističke analize rezultata ispitivanja i dostupnih podataka za veći broj uzoraka izolacionog sistema VN opreme izloženih poznatim naprežanjima tokom različitih vremena eksploatacije (počev od novih pa do uzoraka sa otkazom) utvrđena je statistička raspodela koja pokazuje očekivani preostali vek.

Istraživanja su pokazala da je sa relativno malim brojem merenja na modelima i realnim objektima moguće dobiti pouzdane podatke koji karakterišu EIS. Pri tome se pokazalo da Vejbulova raspodela omogućuje iznalaženje parametara zakona porasta verovatnoće koji omogućuju ekstrapolaciju rezultata sa odgovarajućih modela na realne objekte.

Rezultati ostvareni u okviru izvedenih istraživanja doprinose unapređenju metoda i postupaka ispitivanja i dijagnostike izolacionih sistema visokonaponskih objekata, odnosno doprinose pouzdanijoj predikciji stanja i preostalog životnog veka.

Takođe, dokazana je pouzdanost ispitivanja na adekvatnim modelima izolacionog sistema kako bi se prevazišla neka od ograničenja destruktivnih ispitivanja visokonaponskih izolacionih sistema. Sa druge strane, primena zakona porasta verovatnoće ishoda na adekvatnim uzorcima je znatno ekonomičnije u odnosu na ispitivanje prototipa ili delova realnog visokonaponskog objekata u fazi razvoja proizvoda što se ogleda u uštedi vremena i sredstava i u finansijskim efektima.

Pravci daljih istraživanja bi bili u određivanju numeričkog algoritma za procenu životnog veka prilikom kombinovanog naprežanja VN objekta, npr. termičko i naponsko naprežanje.

Deo istraživanja bi mogao da bude usmeren na ekstrapolaciju rezultata primenom drugih metoda ispitivanja za ocenu stanja izolacije ($\tan\delta$, otpor izolacije, ispitivanje niskom frekvencijom, ispitivanje impulsnim naponom). Takođe, kako se kvarovi kod kablova najčešće dešavaju na spojnica i završnicama, bilo bi poželjno formirati statističke uzorke i od kablovskih spojnica. Za potrebe eksperimenta opisanog u radu, nisu bili dostupne kablovske spojnice već samo završnice.

Bibliography

- [1] F. Zec, N. Kartalović y T. Stojić, «Prediction of high-voltage asynchronous machines stators insulation status applying law on increasing probability,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 116, nº 105524, p. 10, 2020.
- [2] W. Hauschild y W. Mosch, Statistical techniques for high-voltage engineering, IET Power and Energy Series 13, 1992, p. 324.
- [3] Združena elektroprivreda - Beograd, služba za studije i istraživanja, «Tehnička preporuka TP 32, „Izolacioni sistemi rotacionih mašina",» maj 1982.
- [4] F. Zec, J. Mikulović, A. Milošević y S. Milosavljević, «Diagnostics of Failure and New Design of HV Electrostatic Filter Disconnecter in TPP,» de *CIGRE South East European Regional Council Conference*, Vienna, 2020.
- [5] J. Densley, R. Bartnikas y B. S. Bernstein, «Multu-Stress Ageing of Extruded Insulation Systems for Transmission Cables,» *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 9, nº 1, pp. 15-17, 1993.
- [6] B. Jokanović, M. Bebić y N. Kartalović, «The influence of combined strain and constructive solutions for stator,» *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, pp. 36-47, 2019.
- [7] IEC, "60505 Evaluation and qualification of electrical insulation systems," 2017.
- [8] G. C. Stone, «The Statistics of Aging Models and Practical Reality,» *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, vol. 28, nº 5, 1993.
- [9] D. Raković, Fizičke osnove i karakteristike elektrotehničkih materijala, Akademska misao, 2014.
- [10] W. Mosch y A. Ravindra, High Voltage and Electrical Insulation Engineering, First Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [11] J. Mackevich y M. Shah, «Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation,» *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 13, nº 3, May/June 1997.
- [12] G. C. Stone, E. A. Boutler, I. Culbert y H. Dhirani, Electrical Insulation For Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair, A John Wiley & Sons, Inc, Publication, ISBN 0-471-44506-1, 2004.
- [13] I. M. Culbert, H. Dhirani y G. C. Stone, Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, Electric Power Research Institute, 2009.

- [14] G. F. Moore, *Electric Cable Handbook*, Blackwell Science Ltd., 1997.
- [15] I. 60060-1, «High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements,» IEC Webstore, 2010.
- [16] I. 1434, «IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery,» IEEE, 2004.
- [17] IEC, «60270:2000 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements».
- [18] I. 60502-2, «Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV,» IEC Webstore, 2014.
- [19] J. I. McCool, *Using the Weibull Distribution; Reliability, Modeling and Inteferece*, Wiley Series in Probability and Statistics, 2012.
- [20] D. N. Prabhakar Murthy, M. Xie y R. Jiang, *Weibull Models*, A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2004.
- [21] D. Fabiano y L. Simoni, «Discussion on Application of the Weibull Distribution to Electrical Breakdown of Insulating Materials,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, nº 1, Februar 2005.
- [22] M. Choudhary, M. Shafiq, I. Kiitam, A. Hussain, I. Palu y P. Taklaja, «A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables,» *Energies; Special Issue Condition Monitoring of Power System Components*, vol. 15(9), 2022.
- [23] I. Jeftenić, N. Kartalović, D. Brajović y B. Lončar, «Aging of Stator Coil Interconductor Insulation of High Voltage Asynchronous Motor,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, nº 1, 2018.
- [24] M. Marzinotto y G. Mazzanti, «The Statistical Enlargement Law for HVDC Cable Lines; Part 1: Theory and Application to the Enlargement in Length,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, nº 1, Februar 2015.
- [25] M. Marzinotto, G. Mazzanti y C. Mazzetti, «Comparison of Breakdown Performances of Extruded Cables via the Enlargement Law,» de *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2006.
- [26] M. Marzinotto, «On the application of the “Enlargement Law” to Cable Lines,» de *IEEE Russia Power Tech*, St. Petersburg, 2005.
- [27] W. Yuan, T. Wang, H. Ni, M. Gao, Y. Ding, Y. Li, Y. Zhao y Q. Zhang, «Weibull Statistical Analysis of Size Effects on the Impulse Breakdown Strength in Transformer Oil,» de *19th IEEE*

International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, United Kingdom, 25 – 29 June, 2017.

- [28] N. P. Bogorodski, V. V. Pasyukov y B. M. Tareev, «Electrical Engineering Materials,» *Mir Publishers*, 1979.
- [29] S. K. Gupta y A. Kumar, «Fundamentals of Polymer Science and Engineering,» *Tata McGraw-Hill, New Delhi*, 1978.
- [30] M. F. Ashby y D. R. H. Jones, *Engineering Materials 2, An Introduction to Microstructures, Processing and Design*; Second Edition, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [31] J. Brydson, «Plastic Materials,» *Butterworths*, nº 5, 1989.
- [32] R. Vieweg, «Handbook on Synthetic Materials,» *Hanser Munchen*, vol. IV Polyolefins, 1969.
- [33] R. Krohne, «About the developed of space charge in PE at high dc, ac and combined voltage,» *Dissertation TU Hannover Faculty of Mechanical Engineering*, 1978.
- [34] Y. Zhu, H. G. Yoon y K. S. Sub, «Electrical Properties of Silane Crosslinked Polyethylene in Comparison with DCP Crosslinked Polyethylene,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, nº 2, April 199.
- [35] B. M. Bayer, W. K. Moller y W. Zaengl, «High Voltage Engineering (Theoretical and Practical Fundamentals for Application),» *Springer-Verlag Berlin*, 1986.
- [36] M. Brown, «Compounding of Ethylene-Propylene Polymers for Electrical Applications,» *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 10, nº 1, Januar/Februar 1994.
- [37] H.-H. Greve, Rubber, 2. Natural, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [38] Clipper Controls, «<https://www.clippercontrols.com/pages/Dielectric-Constant-Values.html>,» [En línea].
- [39] Yamaden, «http://www.ydic.co.jp/english/technology/table_E.html,» [En línea].
- [40] V. Vahidanasab, A. Mosallanejad y A. Gholami, «Partial Discharge Theory, Modeling and Applications to Electrical Machines,» de *Proc. of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, Tenerife, Spain, December 16-18 (pp130-135).
- [41] N. Kartalović, D. Kovačević y S. Milosavljević, «An Advanced model of partial discharge in electrical insulation,» *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 24, nº 1, pp. 41-55, 2011.

- [42] CIGRE, D1, «Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods, TECHNICAL BROCHURES».
- [43] M. I. A. M. Halim, M. Nur Khairul Hafizi Rohani, N. Rosle y A. Shuhada Rosmi, «Location Technique based on Multiple Partial Discharge Signal in 11 kV Underground Power Cable using EMTP-ATP Software,» *Journal of Physics Conference Series* 1793(1):012071, Februar 2021.
- [44] R. C. F. Araujo, R. M. S. de Oliveira y F. J. Barros, «Automatic PRPD Image Recognition of Multiple Simultaneous Partial Discharge Sources in On-Line Hydro-Generator Stator Bars,» *Energies*, vol. 15(1), nº 326, Januar 2022.
- [45] «<http://www.capturedlightning.com/frames/lichtenbergs.html>,» [En línea].
- [46] IEC 60085, «Electrical insulation - Thermal evaluation and designation,» 2007.
- [47] X. R. Chen, Y. Xu, X. Cao y S. Gubanski, «Investigation of temperature effect on electrical trees in XLPE cable insulation,» de *IEEE*, Montreal, QC, Canada, Decembar 2012.
- [48] G. Klempner y I. Kerszenbaum, *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*, 3 rd Edition, Wiley IEEE Press, Jun 2018.
- [49] Omicron Academy, «Field diagnostics and diagnostic monitoring of HV insulation at generators, motors, transformers and cables (part I),» Mart 2015.
- [50] Pemen y A. J. Pemen, «Research output: Thesis, Phd Thesis,» Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2000.
- [51] G. Detlev, «Teilentladungdiagnose an Motoren und Generatoren,» *Power Diagnostix Systems GmbH*, Achen, 2002.
- [52] Fabrika „ FKS Energetski kablovi", «<https://www.fks.co.rs/fks/energet.htm>,» [En línea].
- [53] P. C. J. M. van der Wielen, «On-line Detection and Location of Partial Discharges in Medium-Voltage Power Cables,» *Eindhoven University Press*, 2005.
- [54] R. Bartnikas y K. Srivastava, «Power and communication cables, theory and applications,» *IEEE Press and McGraw-Hill*, New York, 2000.
- [55] K. Kaminaga, M. Ichihara, M. Jinno, O. Fujii, S. Fukunaga, M. Kobayashi y K. Watanabe, «Development of 500 kV XLPE cables and accessories for long-distance underground transmission lines. V. long-term performance for 500 kV XLPE cables and joints,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, nº 3, pp. 1185-1194, 1996.
- [56] D. Đorić, J. Mališić, V. Jevremović y E. Nikolić-Đorić, *Atlas Raspodela*, Beograd: Građevinski fakultet Beograd, 2007.

- [57] M. Gol y A. Abur, «A Modified Chi-Squares Test for Improved Bad Data Detection,» de *IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, 2015.
- [58] A. P. King y R. J. Exkersley, *Statistics for Biomedical Engineers and Scientists; How to Visualize and Analyze Data*, Elsevier Ltd., 2019.
- [59] P. M. Đurić y J. Miguez, «Model Assessment with Kolmogorov-Smirnov statistics,» de *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Taipei, Taiwan, April 2009.
- [60] E. N. Brown, «Chapter 14,» de *Theory of Point Processes for Neural Systems*, Elsevier, 2003.
- [61] «Nonparametric Tests,» [En línea]. Available: https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704_nonparametric/bs704_nonparametric4.html.
- [62] Y. Lei, «Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*),» *JOURNAL OF FOREST SCIENCE*, vol. 54, pp. 566-571, 2008.
- [63] M. Teimouri, J. W. Doser y A. O. Finley, «ForestFit: An R package for modeling tree diameter distributions,» *arXiv:1911.11002 [stat.AP]*, 2019.
- [64] N. Kartalović, D. Ostojić y M. Tomašević, «Stohastičnost dielektrične čvrstoće izolacionih materijala i njena statistička analiza,» *Elektroprivreda 2, Beograd*, 1997.
- [65] F. Zec y N. Kartalović, «Zakon porasta verovatnoće proboja u VN tehnici,» de *CIGRE 34. savetovanje; Studijski komitet D1- Materijali i savremene tehnologije*, Vrnjačka Banja, jun 2019.
- [66] H. Hirose, «A Method to Estimate the Lifetime of Solid Electrical Insulation,» *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vols. %1 de %2EI-22, nº 6, Decembar 1987.
- [67] I. 62.2, «IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus - Electrical Machinery,» IEEE, 2004.
- [68] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis; The study of uncertainties in physical measurements*, Sausalito, California: University Science Books, 1997.
- [69] M. P. Maples, D. E. Reichart, N. C. Konz, T. A. Berger, A. S. Trotter, J. R. Martin, D. A. Dutton, M. L. Paggen, R. E. Joyner y C. P. Salemi, «Robust Chauvenet Outlier Rejection,» *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 238, nº 1, Septembar 2018.

Biografski podaci

Filip Zec, master inženjer elektrotehnike i računarstva

Filip Zec je rođen 27.09.1990. u Beogradu, Srbija. Osnovnu školu „Branko Radičević“ i Devetu gimnaziju „Mihailo Petrović Alas“ je završio u Beogradu. Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 2009. godine. Diplomirao je 2013. godine na Odseku za Energetiku – smer Energetski pretvarači i pogoni, na temu „Integrisani sistem generatorskog prekidača i oklopljenih generatorskih sabirnica“. Na istom fakultetu završava master studije – smer Elektroenergetski sistemi, na temu „Monitoring i dijagnostika, kvarovi i popravke izolacionih sistema namotaja rotora velikih turbogeneratorsa“. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je 2014. godine na modulu Elektroenergetske mreže i sistemi. Položio je sve ispite i ispunio je sve obaveze propisane studijskim programom sakupivši predviđenih 120 ESPB. Od 2013. do 2017. godine je radio u FIMEL Company d.o.o, na razvoju, konstrukciji i realizaciji provodnih izolatora i rastavljača-uzemljivača za VN napajanje elektrostatičkog filtera, kao i na razvoju i konstrukciji sprežne jedinice za on lajn monitoring parcijalnih pražnjenja na velikim obrtnim mašinama. 2017. godine prelazi da radi u Elektrotehnički institut Nikola Tesla AD Beograd kao stručni saradnik, istraživač pripravnik, na razvoju i implementaciji kompletnog sistema za magnetni monitoring i monitoring parcijalnih pražnjenja na generatorima, kao i na formiranju i opremanju VN laboratorije za visokonaponska ispitivanja kod razvoja novih proizvoda.

Istraživačkim radom se bavi u oblasti visokonaponskih ispitivanja, ispitivanja parcijalnih pražnjenja kao i primenom statističkih metoda na procenu stanja izolacije na elektroenergetskim objektima. Sve pomenute aktivnosti baziraju se na radu u laboratoriji i na terenu, primenom standardizovanih, akreditovanih metoda i tehnika merenja. Neki od rezultata istraživačkog rada su publikovani na domaćim i međunarodnim konferencijama, kao i u naučnim časopisima. Dodatna usavršavanja stekao je na međunarodnim kursovima kompanije Omicron Energy u Austriji u oblasti parcijalnih pražnjenja na visokonaponskoj elektroenergetskoj opremi.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Филип Зец

Број индекса 5046/2014

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Предикција стања изолационог система високонапонске електроенергетске опреме применом закона пораста вероватноће

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 27. 02. 2023.

Филип Зец

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Предикција стања изолационог система високонапонске електроснергетске опреме применом збокова прости вероватноће

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

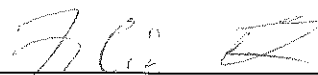
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 27.02.2023



Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Филип Зец

Број индекса 5046/2014

Студијски програм Електроенергетске мреже и системи

Наслов рада Предикција стања изолационог система високонапонске електроенергетске опреме применом закона прости вероватноће

Ментор проф др Јован Микловић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истовестна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 27.02.2023

