

1

Nivelul de ținere al izolației

Coordonarea izolației înseamnă alegerea ținerii izolației, respectiv a distanțelor izolante, astfel încât să permită funcționarea rețelei sau echipamentului cu risc de defectare nul sau minim. Pentru a specifica nivelul de ținere trebuie cunoscute condițiile de mediu curente și standard în vigoare. Există mai mulți parametri care trebuie definiți pentru a descrie ținerea izolației. În acest capitol sunt descrise metodele de evaluare a ținerii izolației și se prezintă metodele de încercare pentru verificarea ținerii.

1.1 Tipuri de izolație

Izolația poate fi clasificată ca fiind internă sau externă, autoregeneratoare și neautoregeneratoare.

1.1.1 Izolație externă

Izolația externă constă în distanțe de aer sau de-alungul suprafețelor izolației solide în contact cu atmosfera, care sunt supuse solicitărilor electrice și influenței atmosferei. Ca exemple sunt distanțele între conductoare și față de pământ, carcasa de porțelan ale izolatoarelor de trecere, izolatoarele suport și separatoarele.

1.1.2 Izolație internă

Izolația internă este partea interioară, solidă, lichidă sau gazoasă a izolației echipamentului, care este protejată de carcasă față de influența atmosferei. Ca exemple: izolația internă a transformatoarelor și a cablurilor. Echipamentele pot avea o combinație de izolație internă și externă. Ca exemple: izolatoarele de trecere, transformatoarele și întrerupătoarele.

1.1.3 Izolația autoregeneratoare

Este denumită autoregeneratoare izolația care își reface complet proprietățile izolante după ce a fost sediul unei descărcări electrice (străpungere respectiv conturnare) datorată aplicării tensiunii. Izolația externă este, în general, autoregeneratoare.

1.1.4 Izolație neautoregeneratoare

Este acea izolație ale cărei proprietăți izolante nu se refac complet după ce a fost sediul unei descărcări electrice (străpungere) datorată aplicării unei tensiuni. În general, izolația internă este neautoregeneratoare.

1.2 Definirea ținerii izolației echipamentelor.

Toți parametrii care definesc ținerea izolației se bazează pe următoarele condiții atmosferice standard:

1. Temperatura 20°C;
2. Presiunea aerului: 101,3 kPa sau 760 mm Hg;
3. Umiditatea absolută 11g apă /m³ de aer;
4. Intensitatea ploii artificiale 1..1,5 mm de apă /minut.

1.2.1 Nivelul de izolație la tensiune de impuls de trăsnet

Nivelul de izolație la tensiune de impuls de trăsnet reprezintă rigiditatea dielectrică a izolației exprimată prin valoarea de vârf a „*impulsului standard de trăsnet*”. Nivelul de izolație este definit pentru o anumită formă de impuls și pentru condiții atmosferice standard.

Nivelul de izolație la tensiune de impuls de trăsnet poate fi definit fie *convențional* (determinist), fie *statistic*. Definiția statistică este aplicabilă numai izolației autoregeneratoare, în timp ce definiția deterministă este aplicabilă izolației neautoregeneratoare. Nivelul de izolație la tensiune de impuls de trăsnet este indicat în condiții de *lipsă a umidității* (izolație uscată).

Valoarea convențională (deterministă) a nivelului de izolație la tensiune de impuls de trăsnet este amplitudinea maximă a impulsului de trăsnet pentru care izolația nu prezintă descărcări fiind supusă unui număr impus de aplicări ale impulsului.

Valoarea statistică a nivelului de izolație la tensiune de impuls de trăsnet este amplitudinea impulsului standard de trăsnet pentru care izolația are o probabilitate de ținare de 90%, respectiv o probabilitate de defectare de 10% (U_{10T}).

1.2.2 Nivelul de ținare la impuls de comutație

Nivelul de ținare la impuls de comutație este rigiditatea izolației exprimată prin valoarea de vârf a impulsului standard de comutație. Acest nivel poate fi definit convențional sau statistic, cu aceleași domenii de aplicare privind tipul izolației ca și în cazul trăsnetului. Nivelul de ținare la impuls de comutație se definește întotdeauna *în prezența umidității*.

Valoarea convențională (deterministă) a nivelului de ținare la impuls de comutație: valoarea de vârf a impulsului de comutație standard maxim pentru care izolația nu prezintă descărcări disruptive fiind supusă unui număr impus de aplicări ale impulsului.

Valoarea statistică a nivelului de ținare la impuls de comutație este: valoarea de vârf a impulsului standard de comutație pentru care izolația prezintă 90% probabilitate de ținare și 10% probabilitate de defectare (U_{10C}).

1.2.3 Impulsurile standard

Undele de supratensiune datorate descărcărilor atmosferice sau comutațiilor au forme foarte variate, depinzând de mai mulți factori. În general, au o formă aperiodică cu front scurt și spate mai lung. Întrucât, pe lângă amplitudinea supratensiunilor, forma acestora influențează rigiditatea izolației este foarte important ca toate laboratoarele folosească aceeași formă de impuls pentru încercarea izolației.

Formele generale ale impulsurilor de trăsnet și de comutație sunt prezentate în fig.1.1 și fig.1.2 și sunt descrise prin duratele până la vârf (t_f) și respectiv (t_s) până la semi-amplitudine pe spate. În general, forma impulsului de trăsnet este indicată prin raportul t_f / t_s .

Definiția duratei până la vârf este diferită pentru cele două impulsuri.

Pentru impulsul de trăsnet, durata până la vârf se determină trasând mai întâi o linie între două puncte: acelea în care tensiunea este, pe front, de 30%, respectiv 90% din valoarea de vârf. Punctul în care această dreaptă taie axa abscisei este numit *origine virtuală* și toate intervalele de timp de măsoară de la acest punct. Apoi se trasează o linie orizontală la nivelul de vârf, care se intersectează cu linia precedentă. Intervalul de la originea convențională până la abscisa acestui

punct de intersecție este durata de front sau durata convențională a frontului, t_f . Durata frontului impulsului de trăsnet poate fi exprimată prin relația:

$$t_f = 1,67(t_{90} - t_{30}) \quad (1.1)$$

Timpul de semiamplitudine, t_s , este durata de la originea virtuală până la punctul în care amplitudinea scade la 50% pe spatele impulsului.

Impulsul standard de trăsnet are forma 1,2/50 μs .

În cazul impulsului de comutație, duratele frontului și spatelui impulsului fiind mult mai mari decât ale impulsului de trăsnet, acestea se măsoară de la originea reală a impulsului, deoarece eroarea care ar putea fi comisă este neglijabilă. Durata spatelui este definită ca intervalul de timp până la 50% din amplitudine. Timpul până la vârf se măsoară de la originea

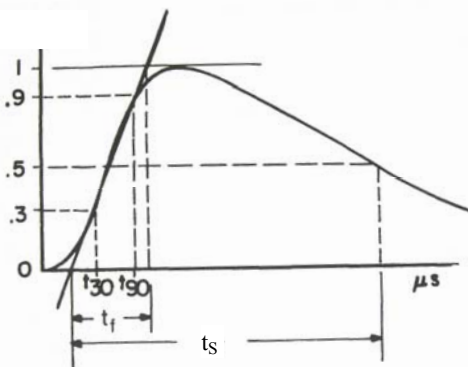


Fig. 1.1 Impulsul de tensiune de trăsnet

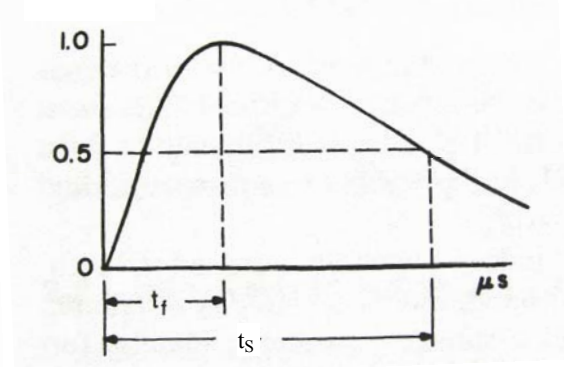


Fig. 1.2 Impulsul de tensiune de comutație

reală până la vârf. Forma standard a impulsului este indicată în același mod ca pentru impulsul de trăsnet: 250/2500 μs .

Pentru ambele impulsuri se admit toleranțele din tabelul 1.1 cu privire la duratele de front și de semiamplitudine.

Tabelul 1.1 Toleranțele formei impulsurilor de tensiune standard

	Impulsul de trăsnet 1,2/50 μs	Impulsul de comutație 250/2500 μs
Durata frontului	$\pm 30\%$	$\pm 20\%$
Durata semiamplitudinii	$\pm 20\%$	$\pm 60\%$

1.2.4 Nivele de ținere statistice și convenționale

Pentru verificarea statistică a ținerii izolației autoregeneratoare, se aplică un număr suficient de mare de impulsuri, astfel ca să se poată evalua probabilitatea de ținere/descărcare cu o eroare admisibilă. Cu cât amplitudinea impulsului aplicat este mai mare, cu atât probabilitatea de descărcare crește, dar dependența probabilității de descărcare de amplitudinea impulsului este neliniară. Pentru izolația autoregeneratoare, în general, rigiditatea izolației poate fi reprezentată printr-o distribuție cumulativă Gauss, având forma grafică din fig.1.3. Valoarea medie a acestei distribuții este denumită **tensiune critică de descărcare**, U_{50} . Aplicarea U_{50} pe o izolație produce descărcarea cu o probabilitate de 50%. Conform ecuației curbei distribuției cumulate a rigidității

izolației, valorile U_{10} sunt mai mici decât U_{50} cu de 1,28 ori deviația standard, σ_f , atât pentru impulsurile de trăsnet cât și de comutație :

$$U_{10T} = U_{50T} \left(1 - 1,28 \frac{\sigma_f}{U_{50T}} \right); U_{10C} = U_{50C} \left(1 - 1,28 \frac{\sigma_f}{U_{50C}} \right). \quad (1.2)$$

Considerând un șir de rezultate experimentale ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$), se definește valoarea medie:

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

iar dispersia rezultatelor se calculează cu relația:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{med})^2}{n}}.$$

Deviația standard, σ_f , exprimată în unități relative față de U_{50} (σ_f/U_{50}) mai este numită **coeficient de variație**. Astfel $\sigma_f = 5\%$ este interpretat ca având o valoare de 5% din U_{50} . Deviațiile standard diferă pentru cele două impulsuri standard. Pentru trăsnet, $\sigma_f = 2 \dots 3\%$, iar pentru comutație variază între 5% pentru izolația stâlpilor și 7% pentru izolația stațiilor de transformare.

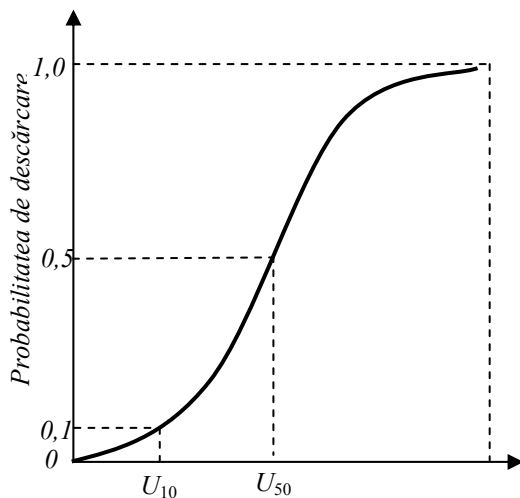


Fig.1.3 Caracteristica ținerii izolației autoregeneratoare

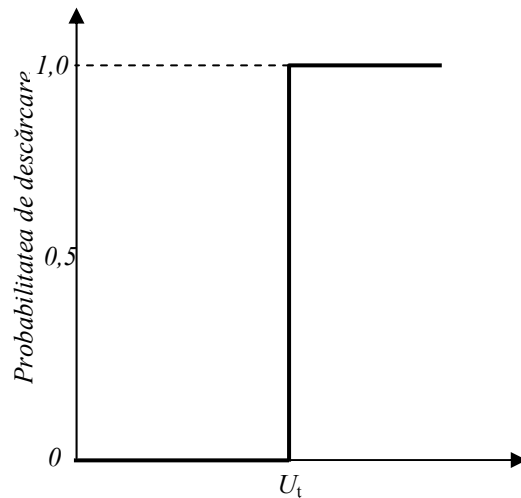


Fig.1.4 Caracteristica ținerii izolației ne-autoregeneratoare

1.2.5 Teste pentru verificarea ținerii izolației la impulsuri de trăsnet și de comutație

Încercările pentru verificarea ținerii izolației la impulsuri de trăsnet și de comutație se împart în *convenționale* și *statistice*.

Nivelele convenționale de ținere la impulsuri de trăsnet și de comutație sunt mai simplu definite, dar au semnificație mai redusă referitor la ținerea izolației. Deoarece nivelele convenționale sunt legate de izolația neautoregeneratoare, trebuie ca și încercările să fie nedistructive. Se aplică izolației unul sau mai multe impulsuri standard cu amplitudinea egală cu nivelele de ținere normate la impulsuri de trăsnet sau de comutație. Astfel comportarea izolației este definită ca în fig.1.4: probabilitatea de ținere este de 100 % dacă izolația a suportat toate

impulsurile aplicate sau 0% pentru aceeași amplitudine a impulsului, dacă a cedat la cel puțin unul dintre acestea.

Dacă apar descărcări cu ocazia încercării, echipamentul este rebutat. În cazul seriilor de fabricație medii sau mari, se poate admite, eventual, o rată de eșec, dar foarte mică. De exemplu, pentru transformatoare, dacă această rată atinge 1%, producția trebuie oprită și să se revadă proiectul sau tehnologia de fabricație.

Nivelele statistice de ținere. Considerând definiția statistică a ținerii izolației la impulsuri de trăsnet sau de comutație, teoretic, nici un test nu poate dovedi că probabilitatea de defectare a izolației este, de exemplu, 10%. Dacă izolația este autoregeneratoare, sunt permise mai multe descărcări disruptive. Teoretic, astfel ar putea fi determinată întreaga caracteristică a rigidității din fig.1.3, de unde pot rezulta U_{10} sau U_{50} . Totuși, astfel de teste nu se fac, cu excepția fazei de proiectare a echipamentelor, fiind costisitoare și consumând mult timp. Pentru omologare, predomină două tipuri de teste. Sunt posibile mai multe tipuri de teste pentru estimarea U_{10} .

1. Testul n/m : se aplică m impulsuri. Testul este trecut dacă nu apar mai mult de n descărcări. Testul preferat de IEC (International Electrotechnical Commission = Comisia Electrotehnică Internațională) este 2/15.

2. Testul $m+n$: se aplică m impulsuri. Dacă nu apare nici o descărcare, testul este reușit. Dacă apar două sau mai multe descărcări, testul este eșuat. Dacă apare numai o descărcare, se aplică alte n impulsuri, iar testul este considerat reușit dacă nu mai apare vreo descărcare. Pentru întrerupătoare se folosește, în prezent testul 3+3. În standardele CEI, un test alternativ la 2/15, dar mai puțin preferat este testul 3+9.

1.2.6 Determinarea valorilor U_{50} și σ_f/U_{50}

O metodă frecvent folosită pentru specificarea ținerii izolației este determinarea valorilor U_{50} și σ_f/U_{50} . Această metodă se folosește numai pentru izolația autoregeneratoare, dacă sunt admise descărcările. Realizarea acestor teste se poate explica printr-un exemplu. Se presupune că în laborator se aplică impulsuri de comutație unui izolator de stâlp. Mai întâi, se aplică de 100 ori un impuls cu amplitudinea de 950 kV, iar două dintre impulsuri produc conturnarea izolatorului, astfel că probabilitatea de conturnare este 0,02.

Crescând amplitudinea la 1000 kV, din 40 de aplicări ale impulsului, apar 20 conturnări, deci probabilitatea de conturnare este de 50%. Apoi amplitudinea este mărită sau redusă pentru a obține alte rezultate, precum acelea cuprinse în tabelul următor.

Amplitudinea impulsului, kV	Numărul de impulsuri	Numărul de conturnări	Procentul de conturnări, %
950	100	2	2
1000	40	20	50
1050	40	33	82,5
1075	100	93	93
960	40	7	17,5
980	40	16	40
960	40	10	25

Aceste rezultate sunt reprezentate pe o hârtie probabilistică normală sau Gaussiană, și se trasează cea mai potrivită dreaptă printre acele puncte, ca în fig. 1.5. Valoarea medie, pentru 50% probabilitate, se obține din acest grafic și aceasta este U_{50} . Conform ecuației distribuției

cumulate de probabilitate Gauss, deviația standard este diferența de tensiune între punctele de 16% și 50% sau între 50% și 84%. În fig. 1.5, U_{50} rezultă a fi 1000 kV, iar deviația standard, σ_T este de 50 kV. Astfel, σ_T/U_{50} este 5%. Dacă se dorește U_{10} , valoarea poate fi găsită la probabilitatea de 10% și este de 936 kV. Cei doi parametri, U_{50} și σ_T definesc complet caracteristicile izolației pe baza ipotezei că este adecvată în acest caz distribuția cumulativă Gauss.

Distribuția cumulată Gauss este nelimitată la stânga. Desigur, în practică nu este așa deoarece există o tensiune sub care descărcările nu se mai produc, deci probabilitatea de descărcare este nulă. De asemenea, peste o altă amplitudine a impulsurilor, toate încercările produc descărcări electrice, deci probabilitatea de descărcare este 1. Totuși, în realitate,

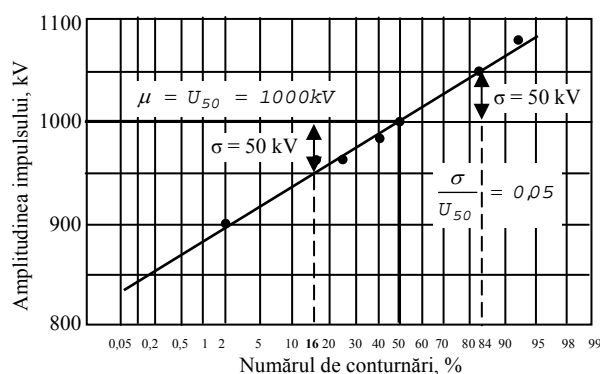


Fig. 1.5 Caracteristica ținării izolației pe o hârtie probabilistică Gauss

caracteristica izolației este valabilă până la $\pm 4\sigma_T$ față de U_{50} , ceea ce este suficient pentru aplicații.

Aplicarea procedurii descris mai sus pentru determinarea parametrilor statistici ai ținării izolației autoregeneratoare este greoaie prin timpul necesar aplicării unui număr suficient de mare de impulsuri pentru ca eroarea statistică să fie rezonabil de mică. În cele mai multe cazuri, se dorește să se obțină experimental valoarea U_{50} pentru o izolație, mai ales când se fac teste cu impulsuri de trăsnet. Un procedeu folosit frecvent este numit *metoda sus-jos*:

1. Se estimează U_{50} . Se aplică un impuls. Dacă apare descărcarea, se reduce tensiunea cu cca. 3%. Dacă nu apare descărcarea, se mărește tensiunea cu cca. 3%. În continuare, dacă apare descărcarea, se scade tensiunea cu 3%, iar dacă nu apare, se crește cu 3%.

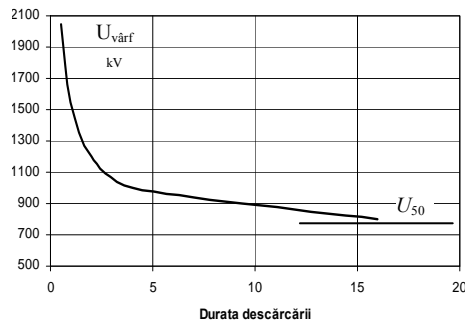
2. Se continuă astfel până la cca. 50 impulsuri. Se exclud impulsurile la care nu a apărut nici o descărcare. U_{50} este media aritmetică a amplitudinilor impulsurilor rămase.

Pe baza acestei valori și adoptând coeficienți de variație recomandați pentru izolația autoregeneratoare, în cazul impulsurilor de trăsnet sau de comutație, se pot determina tensiunile de încercare statistice U_{10T} și U_{10C} , folosind ecuațiile (1.2).

1.2.7 Curbele tensiune-timp

Pentru a stabili mai exact rigiditatea izolației în cazul solicitării de durată scurtă, se poate recurge la curba tensiune-timp. Aceasta se obține, pentru izolațiile autoregeneratoare, folosind impulsul standard de trăsnet. Procedura constă în aplicarea unor impulsuri de amplitudine tot mai mare și măsurarea timpului până la descărcare. De exemplu, testele pot da rezultatele din tabelul alăturat, redate în fig. 1.6. Curba tinde către o dreaptă de la cca. 16 μ s. Valoarea asimptotică este

egală cu U_{50} . Adică, pentru izolațiile de aer, U_{50} apare la o durată a descărcării de cca. 16 μ s. Durata descărcării poate depăși acest timp, dar amplitudinea impulsului rămâne aproximativ aceeași ca U_{50} . Datele din fig. 1.6 nu sunt tipice, deoarece este normală o împrăștiere mai mare.



Amplitudinea, kV	Durata descărcării, μ s
700	fără desc.
780	fără desc.
800	16
1000	4
1200	2
1550	1
2050	0,5

Fig. 1.6 Exemplu de curbă tensiune-timp

1.3 Influența condițiilor atmosferice

Tensiunile de ținere la impuls de trăsnet sau de comutație sunt specificate pentru condiții atmosferice normale. Totuși, chiar și în laborator rareori se întâlnesc condițiile atmosferice standard. Astfel, sunt necesari factori de corecție pentru a stabili amplitudinea impulsului care trebuie aplicat pentru ca încercarea să fie valabilă. Să considerăm că în laborator există condiții nestandard. Atunci, pentru a verifica ținerea izolației în aceste condiții, amplitudinea impulsului trebuie mărită sau redusă, astfel ca valoarea respectivă să corespundă nivelului de ținere standard care se definește pentru condiții normale.

Dacă se notează tensiunea măsurată în condiții nestandard cu U_A , iar în condiții standard, cu U_S , între aceste valori este valabilă relația (1.3), adoptată de către Comitetul 42 al IEC

$$U_A = \delta^m H_c^w U_S \quad (1.3)$$

unde δ este densitatea relativă a aerului, H_c este factorul de corecție pentru umiditate, iar m și w sunt constante care depind de factorul G_0 definit ca

$$G_0 = \frac{U_{50S}}{500S}, \quad (1.4)$$

unde S este distanța disruptivă în metri iar U_{50S} este valoarea U_{50} în condiții standard.

Relația 1.3 poate fi folosită pentru orice valoare a nivelului de ținere la impulsuri de trăsnet sau de comutație (U_{10} sau U_{50}):

$$\begin{aligned} U_{50A} &= \delta^m H_c^w U_{50S} \\ U_{10A} &= \delta^m H_c^w U_{10S} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Factorul de corecție pentru umiditate poate fi calculat cu relația

$$H_c = 1 + 0,0096 \left[\frac{H}{\delta} - 11 \right] \quad (1.6)$$

unde H este umiditatea absolută în g/m^3 . Mărima acesteia se poate obține experimental cunoscând valorile temperaturii indicate de termometrele umed și uscat și dispunând de nomogramele adecvate. Pentru condiții de ploaie artificială, $H_c = 1$.

Valorile lui m și w pot fi obținute din tabelul 1.2.

Tabelul 1.2 Valori pentru m și w

G_0	m	w
$G_0 < 0,2$	0	0
$0,2 < G_0 < 1,0$	$m = w = 1,25 G_0(G_0 - 0,2)$	
$1,0 < G_0 < 1,2$	1	1
$1,2 < G_0 < 2,0$	1	$1,25(2,2 - G_0)(2 - G_0)$
$G_0 > 2,0$	1	0

Relațiile (1.5) pot fi particularizate ținând seama situațiile întâlnite frecvent în rețele de înaltă tensiune.

Impuls de trăsnet

Pentru impulsuri de trăsnet, G_0 are valori practice între 1 și 1,2. Deoarece, conform tab.1.2, $m = w = 1$, relațiile (1.5) devin

$$U_{TA} = \delta H_c U_{TS}. \quad (1.7)$$

Impuls de comutație

Pentru impulsuri de comutație, G_0 ia, de obicei, valori între 0,2 și 1, astfel că

$$m = w = 1,25 G_0 (G_0 - 0,2). \quad (1.8)$$

În prezența umidității

$$U_{CA} = (\delta H_c)^m U_{CS}. \quad (1.9)$$

Densitatea relativă a aerului se definește ca

$$\delta = \frac{p T_0}{p_0 T}. \quad (1.10)$$

Deoarece densitatea aerului este funcție de presiune, este funcție de altitudine. Standardul IEC 71.2 propune relația:

$$\delta = e^{-A/8,6}. \quad (1.11)$$

Proiectarea ținerii izolației se face în condiții de ploaie artificială ($H_c = 1,0$) atât pentru impulsuri de trăsnet cât și de comutație. Ținând seama de valorile tipice ale exponenților m și w , prezentate mai sus, sunt propuse următoarele relații:

(1) Pentru impulsuri de trăsnet

$$U_{TA} = \delta U_{TS} \quad (1.12)$$

(2) Pentru impulsuri de comutație

$$U_{CA} = \delta^m U_{CS} \quad (1.13)$$

Câteva exemple pot clarifica procedura. Aceste aplicații se pot încadra în două grupe:

I. Se cunosc tensiunile de ținerie standard și se cere stabilirea tensiunilor de încercare pentru condițiile locale.

Se aplică direct relațiile calcul a tensiunii de încercare pentru condițiile existente în laborator.

Exemplul 1. Tensiunea U_{50S} impuls de comutație, la polaritatea pozitivă în condiții standard este de 1400 kV, pentru o distanță de descărcare de 4 m. Să se determine U_{50A} la 2000 m altitudine, unde $\delta = 0,7925$. Se consideră condiții umede, deci $H_c = 1$.

Se folosește relația

$$U_{CA} = \delta^m U_{CS} .$$

$$G_0 = \frac{U_{50CS}}{500 * S} = \frac{1400}{4 * 500} = 0,7$$

$$m = 1,25 G_0 (G_0 - 0,2) = 1,25 * 0,7 * (0,7 - 0,2) = 0,4375$$

$$U_{50CA} = \delta^m U_{50S} = 1400 * 0,7925^{0,4375} = 1265 \text{ kV}$$

Exemplul 2. U_{50S} pentru impuls de trăsnet pozitiv în condiții atmosferice standard este de 2240 kV pentru o distanță de descărcare de 4 m. Se consideră condiții umede, deci $H_c = 1$. Să se calculeze U_{50A} la altitudinea de 2000 m, unde densitatea relativă a aerului este 0,7925.

Se folosește relația

$$U_{TA} = \delta U_{TS} .$$

$$U_{50A} = 0,7925 * 2240 = 1775 \text{ kV} .$$

Exemplul 3. Un întrerupător, având lungimea liniei de fugă (distanța disruptivă) de 2,5 m trebuie testat pentru U_{10TS} normat de 1300 kV și U_{10CS} normat de 1050 kV. În laborator, $\delta = 0,9$, iar umiditatea absolută este de 14 g/m³. Testul pentru U_{10TA} se efectuează fără ploaie artificială, iar pentru U_{10CA} în prezența acesteia. Raportul $\sigma_f / U_{50T} = 0,03$, iar σ_f / U_{50C} este de 0,07. Se cere determinarea tensiunilor de încercare U_{10TA} și U_{10CA} .

Soluție:

a) Tensiunea de încercare la impuls de trăsnet se recalculează pentru condiții nestandard, conform relației (1.7)

$$U_{10TA} = \delta H_c U_{10TS} .$$

Factorul de corecție pentru umiditate este, (1.6)

$$H_c = 1 + 0,0096 \left[\frac{H}{\delta} - 11 \right] = 1 + 0,0096 \left(\frac{14}{0,9} - 11 \right) = 1,0437$$

Tensiunea de încercare pentru testul U_{10TA} este

$$U_{10TA} = (\delta H_c) U_{10TS} = (0,9 * 1,0437) * 1300 = 1221 \text{ kV} .$$

Verificarea ipotezei $m=w=1$.

Aceasta este valabilă, pentru impulsuri de trăsnet, dacă $1,0 < G_0 < 1,2$. Mai întâi se calculează:

$$U_{50TS} = \frac{U_{10TS}}{1 - 1,28 \sigma_f / U_{50TS}} = \frac{1300}{1 - 1,28 * 0,03} = 1352 \text{ kV} .$$

$$\text{Apoi } G_0 = \frac{U_{50TS}}{500 * S} = \frac{1352}{500 * 2,5} = 1,08 > 1, \text{ deci ipoteza este confirmată.}$$

b) Pentru încercarea la U_{10C} relația de principiu este aceeași ca mai sus, dar în condiții de ploaie artificială, $H_c = 1$, deci

$$U_{10CA} = \delta^m U_{10CS}.$$

Deoarece exponentul m se calculează în funcție de G_0 (1.4), mai întâi trebuie determinată valoarea U_{50CS} . În condiții standard, dacă se cunoaște tensiunea de ținere statistică U_{10CS} , se poate calcula U_{50CS} folosind relația (1.2)

$$U_{50CS} = \frac{U_{10CS}}{1 - 1,28\sigma_f / U_{50CS}} = \frac{1050}{1 - 1,28 * 0,07} = 1153kV$$

Mai departe, considerând distanța disruptivă de 2,5 m,

$$G_0 = \frac{U_{50CS}}{500S} = \frac{1153}{500 * 2,5} = 0,922$$

$$m = 1,25G_0(G_0 - 0,2) = 1,25 * 0,922(0,922 - 0,2) = 0,833$$

$$U_{10CA} = 0,90^{0,833} * 1050 = 962kV$$

II. Se determină experimental nivelul de ținere în condiții nestandard și se cere mărimea ținerii în condiții standard.

Exemplul 4. La 2000 m altitudine $\delta = 0,7925$, iar U_{50CA} pentru impuls de comutație de polaritate pozitivă, în condiții umede este de 1265 kV pentru un interval disruptiv de 4 m. Să se afle U_{50CS} .

Soluție:

Se folosește relația

$$U_{50CA} = \delta^m U_{50CS},$$

de unde

$$U_{50CS} = \frac{U_{50CA}}{\delta^m}.$$

Problema nu poate fi rezolvată direct, deoarece m este funcție de G_0 , iar G_0 este funcție de U_{50S} . De aceea U_{50S} pentru condiții standard trebuie obținută prin iterații ca în tabelul următor.

Se admite o valoare prezumată pentru $U_{50S} = 1300$ kV, mai mare decât U_{50CA} , deoarece se trece de la condiții nestandard la condiții standard în care densitatea aerului este mai mare. Urmează calculul valorilor G_0 și m , respectiv a tensiunii U_{50CS} . Dacă valoarea obținută diferă de aceea prezumată, calculul se repetă până când diferența dintre cele două valori scade sub o limită admisă.

U_{50CS}	G_0	m	δ^m (=0,7925 ^m)	$U_{50CS} = U_{50CA} / \delta^m$ (= 1265/0,7925 ^m)
1300	0,650	0,3656	0,9185	1377
1377	0,689	0,4206	0,9068	1395
1395	0,697	0,4337	0,9040	1399
1399	0,700	0,4368	0,9034	1400
1400	0,700	0,4375	0,9033	1400

Anexă - Tensiuni de ținere standardizate

Deoarece proiectarea și fabricarea echipamentelor nu se poate realiza pentru orice valori ale tensiunilor de ținere rezultate din calculele de dimensionare a izolației, s-a stabilit o serie standard de valori pentru tensiunile de ținere. În tabelul A1.1 sunt date valorile cuprinse în Publicația CEI 71/1.

Pentru fiecare tip de echipament sau tip de izolație, trebuie să existe o legătură între tensiunile de ținere la impuls de trăsnet și de comutație. De exemplu, pentru transformatoare U_{10C} este cca. 83% din U_{10T} . Astfel, fiind dată o valoare standard pentru tensiunea de ținere la impuls de trăsnet, tensiunea de ținere la impuls de comutație poate să nu fie specificată în tabele. IEC a prevăzut și teste fază-fază pentru verificarea tensiunii de ținere la impuls de comutație fază-fază. Tensiunea de ținere la impuls de comutație fază-fază standardizată este cam de 1,5 .. 1,7 ori valoarea fază-pământ.

Tabelul A1.1 Seria valorilor standard pentru tensiunile de ținere la impuls de trăsnet și de comutație, conform IEC 71.1 (kV_v)

20	40	60	75	95	125	145	170	250	325
450	550	650	750	850	950	1050	1175	1300	1425
1550	1675	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2900

În principiu, utilizatorul este liber să aleagă nivelele de ținere la impuls de trăsnet și de comutație considerate potrivite. Totuși, practic, există numai un număr limitat de valori admisibile pentru fiecare tensiune a rețelei. CEI specifică tensiunile de ținere la impuls de trăsnet sau de comutație pentru fiecare tensiune de serviciu (exprimată prin *tensiunea cea mai ridicată a rețelei/pentru echipament*). Aceste valori sunt date în tabelele A1.2 și A1.3, în care indicele „fp” se referă la izolația fază-pământ, iar „ff” se referă la izolația fază-fază. Tensiunile de ținere la impuls de comutație sunt specificate numai pentru izolația fază-pământ pentru tensiuni de serviciu de 300 kV și mai mari.

Tabelul A1.2 Nivele de ținere la impuls de trăsnet, conform IEC 71/1

Tensiunea maximă a rețelei, kV _{ef}	U_{50T} , kV _v	Tensiunea maximă a rețelei, kV _{ef}	U_{50T} , kV _v
3,6	20;40	52	250
7,2	40;60	72,5	325
12	60; 75; 95	123	450; 550
17,7	75; 95	145	450; 550; 650
24	95;125; 145	170	550; 650; 750
36	145; 170	245	650; 750; 850; 950; 1050

Tabelul A1.3 Nivele de ținere la impuls de comutație, conform IEC 71/1

Tensiunea maximă a rețelei, kV _{ef}	U_{50Cf-p} kV _v	Raportul U_{50Cff}/U_{50Cfp}	U_{50T} kV _v
300	750	1,5	850 sau 950
	850	1,5	950 sau 1050
362	850	1,5	950 sau 1050
	950	1,5	1050 sau 1175
420	850	1,6	1050 sau 1175
	950	1,5	1175 sau 1300
	1050	1,5	1300 sau 1425
550	950	1,7	1175 sau 1300
	1050	1,6	1300 sau 1425
	1175	1,5	1425 sau 1550
800	1300	1,7	1675 sau 1800
	1425	1,7	1800 sau 1950
	1550	1,6	1950 sau 2100