

Breviar de calcul

Instalațiile complexe ale stațiilor electrice de transformare trebuie protejate atât împotriva loviturilor directe de trăsnet, cât și împotriva undelor de supratensiune care se propagă pe liniile electrice. Protecția împotriva loviturilor directe de trăsnet este realizată de către sistemele de paratrăsnete, iar protecția împotriva undelor de supratensiune ce se propagă pe linii este realizată de către descărcătoarele cu rezistență variabilă. Studiul supratensiunilor de trăsnet în stațiile electrice de transformare are ca obiect alegerea și amplasarea corectă a descărcătoarelor sau verificarea cuprinderii în zona de protecție a descărcătoarelor existente a tuturor instalațiilor, cu un coeficient de siguranță suficient de mare.

Determinarea nivelului supratensiunilor de trăsnet în instalațiile stațiilor de transformare poate fi abordată în două moduri:

- studiul procesului complex de propagare a undelor de impuls de tensiune, luând în considerare reflexiile și refracțiile multiple ale acestora în punctele nodale ale stației;
- analiza regimului tranzitoriu generat de excitarea circuitelor complexe ale stațiilor de transformare de către undele de impuls de tensiune, pe baza legilor circuitelor electrice.

Cea de a doua abordare este, practic, de neconceput fără utilizarea unor aplicații software adecvate. Prima metodă este, de asemenea, foarte laborioasă dacă se operează cu schema nesimplificată a stației. Totuși, studii efectuate în special pe modele fizice au condus la concluzia că este posibilă simplificarea schemei echivalente a stației, prin redistribuirea capacităților de impuls ale echipamentelor. Pentru aceasta se aplică așa-numita regulă a momentelor, capacitățile echipamentelor fiind redistribuite în principalele puncte nodale ale schemei stației, funcție de distanța dintre nodul de concentrare și nodul în care se află capacitatea în schema inițială. Nodurile în care se concentrează capacitățile de impuls ale echipamentelor sunt, în majoritatea situațiilor, nodurile în care se află transformatoarele și descărcătoarele stației de transformare. Reducerea la limită a schemei stației, care, evident, implică și cele mai mari erori de calcul, conduce la obținerea unei singure căi de propagare pe care se află un singur punct nodal cu descărcător și un singur punct nodal cu capacitate concentrată. În această situație, capacitățile sunt concentrate toate în punctul nodal cu transformator. Funcție de poziția relativă a celor două elemente de circuit, în sensul de propagare al undei incidente, se disting două situații, așa cum rezultă din reprezentarea grafică dată în fig. 1.

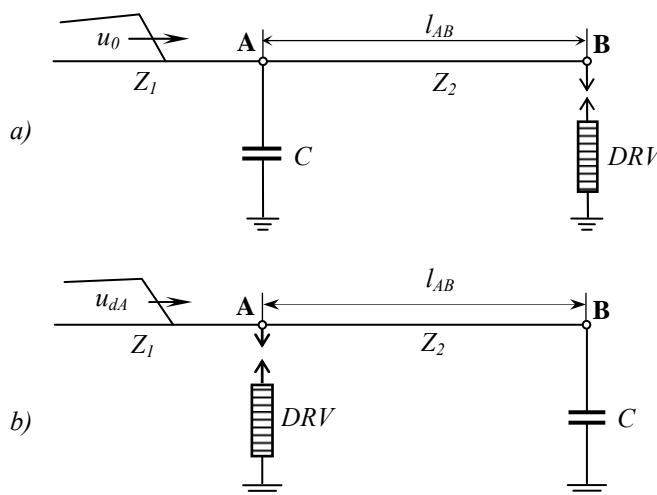


Fig. 1. Scheme echivalente simplificate utilizate pentru determinarea nivelului supratensiunilor de trăsnet în stațiile electrice de transformare: a) – schema cu capacitate în amonte; b) – schema cu descărcător în amonte, în sensul de propagare al undei

Notațiile din fig.1 au următoarea semnificație:

C – capacitatea echivalentă de impuls a stației de transformare;

DRV – descărcător cu rezistență variabilă;

Z_1 – impedanța caracteristică a liniei electrice;

Z_2 – impedanța caracteristică a barelor stației electrice de transformare;

l_{AB} – distanța dintre cele două puncte nodale, distanță care, de obicei, este aceeași cu distanța reală dintre descărcător și transformatorul de putere sau cu distanța maximă dintre cele două tipuri de echipamente ale unei stații date;

u_0, u_{dA} – unda de tensiune incidentă (undă directă în nodul **A**).

În asemenea scheme simple, nivelul supratensiunii care solicită izolația transformatorului poate fi determinat prin metode grafo-analitice. Abordarea celor două tipuri de schemă este diferită, un grad mai mare de complexitate prezentând cazul al doilea.

Pentru cazul în care capacitatea echivalentă se află în amonte de descărcător, în sensul de propagare al undei (fig.1,a), se neglijează, pentru început prezența capacității. În acest fel, se introduce o nouă ipoteză simplificatoare, însă rezultatele vor fi acoperitoare, efectul capacității concentrate fiind acela de micșorare a pantei undei de impuls. Dacă acestei noi scheme de propagare i se aplică regula lui Petersen, se obține schema echivalentă omogenă, cu parametri concentrați, reprezentată în fig.2. Această schemă este valabilă pentru cazul în care impedanțele caracteristice ale liniei și barelor sunt egale ($Z_1 = Z_2 = Z$). Evident, prin circuit va circula un curent numai atâta timp cât descărcătorul este în funcțiune (amorsat).

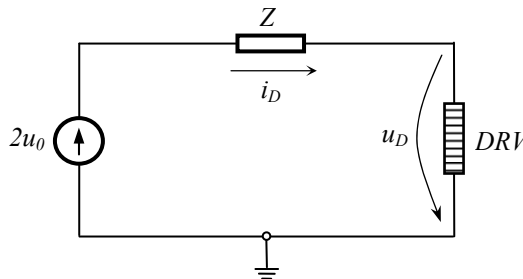


Fig. 2. Schema echivalentă omogenă rezultată prin aplicarea regulii lui Petersen în schema din fig.1,a, în condițiile neglijării capacității concentrate din această schemă

Sistemul de ecuații care descrie funcționarea circuitului, după amorsarea descărcătorului, este următorul:

$$\begin{cases} 2 \cdot u_0 = Z \cdot i_D + u_D \\ u_D = f(i_D) \end{cases}, \quad (1)$$

în care cea de a doua ecuație este caracteristica tensiune-curent a rezistorului nelinear al descărcătorului.

Datorită nelinearității caracteristicii tensiune-curent a rezistorului descărcătorului, sistemul de ecuații (1) se rezolvă grafo-analitic, prin metoda caracteristicilor (metoda lui Bergeron). Membrul stâng al primei ecuații se reprezintă, ca o funcție de tip, în cadranul unui al sistemului de axe $-u0t$. Cea de a doua ecuație, ca și membrul drept al primei ecuații, se reprezintă, ca o funcție de intensitatea curentului prin descărcător, în cadranul doi al sistemului de axe $-u0i_D$. Până când amorsează descărcătorul, tensiunea pe acesta variază după unda incidentă ($2u_0$). După amorsare, variația în timp a tensiunii pe descărcător se determină astfel:

- la diferite niveluri de tensiune se trasează drepte paralele cu abscisa;
- la intersecția acestora cu curbele care descriu cei doi membri ai primei ecuații, se trasează segmente de dreaptă paralele cu ordonata;

- la intersecția segmentelor trasate în cadranul II cu caracteristica $u_D = f(i_D)$, se trasează un nou segment de dreaptă paralel cu abscisa;
- la intersecția acestui segment cu segmentul vertical trasat în cadranul I, se obține valoarea tensiunii pe descărcător, la acel moment de timp.

Reprezentarea grafică a modului de aplicare al metodei caracteristicilor este dată în fig.3, în care se poate observa, în cadranul I, caracteristica $u_D = f(t)$.

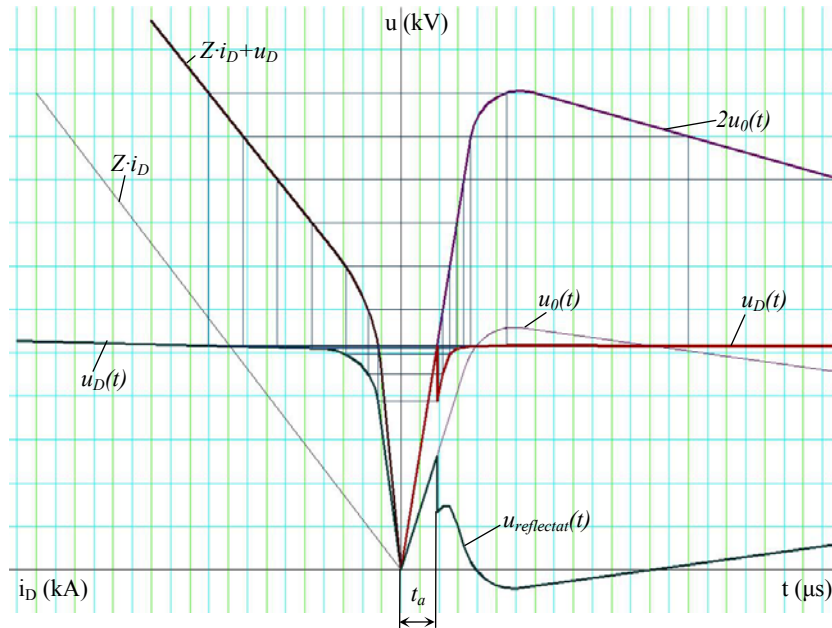


Fig. 3. Exemplu de utilizare a metodei caracteristicilor pentru rezolvarea sistemului de ecuații (1), care descrie funcționarea schemei din fig. 2.

Tensiunea din nodul **A**, pe capacitate, se obține sumând, la un același moment de timp, amplitudinea unei incidente în acest nod (u_0) cu amplitudinea unei reflectate din nodul **B**. Pentru a determina evoluția în timp a unei reflectate – $u_{reflectat}(t)$ – se pornește de la observația că în orice nod al rețelei și în orice moment tensiunea rezultată este suma tensiunii unei incidente cu aceea a unei reflectate, astfel:

$$u_D = u_0 + u_{reflectat} \Rightarrow u_{reflectat} = u_{B \rightarrow A} = u_D - u_0. \quad (2)$$

Ecuția (2) se rezolvă pe cale grafică, așa cum se poate observa din fig.2.

Atunci când se sumează unda incidentă și unda reflectată în nodul **A**, trebuie să se țină seama de faptul că, față de reprezentarea grafică din fig.2, unei reflectate din nodul B îi este necesar un anumit interval pentru a se propaga pe tronsonul de bare de lungime l_{AB} . Astfel, dacă se consideră ca moment inițial al analizei momentul în care unda incidentă ajunge în nodul **A**, unei reflectate în este necesar un interval de timp

$$\tau = \frac{2 \cdot l_{AB}}{v}, \quad (3)$$

pentru a ajunge și ea în nodul **A**. În aceste condiții, sumarea grafică a unei incidente și a celei reflectate se efectuează conform figurii 4, în care este evidențiat acest decalaj.

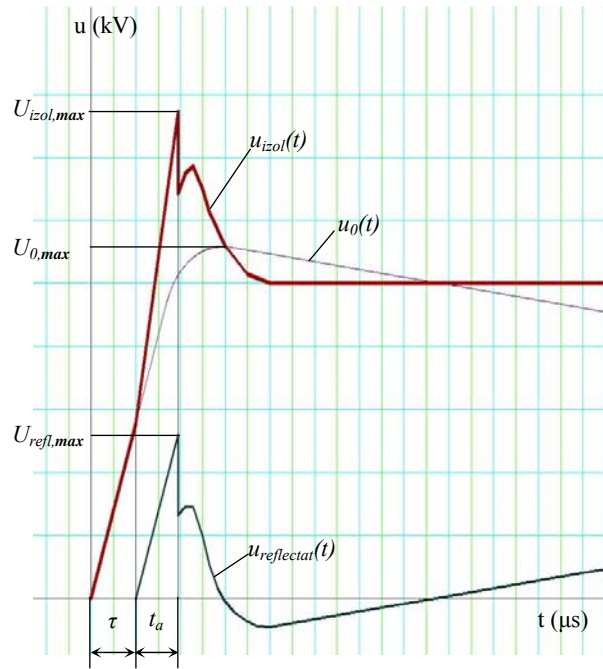


Fig. 4. Exemplu de sumare grafică a undelor incidentă și reflectată în nodul cu capacitate, pentru schema de propagare din fig.1,a.

Rezultă că tensiunea pe izolația echipamentului instalat în nodul **A** se obține prin rezolvarea sistemului de ecuații

$$\begin{cases} u_A(t) = u_{izol}(t) = u_0(t) + u_{reflectat}(t - \tau) \\ \tau = \frac{2 \cdot l_{AB}}{v} \end{cases}, \quad (4)$$

în care v este viteza de propagare a undelor electromagnetice pe barele stației, viteză care poate fi considerată aproximativ egală cu viteza luminii.

Dacă se observă, din fig.3, că panta pe frontul undei reflectate, până la momentul t_a al amorsării descărcătorului este egală cu panta undei incidente în nodul **A**, atunci, din fig.4, rezultă nivelul maxim al solicitării izolației echipamentului din nodul **A**:

$$U_{izol,max} = u_0(t_a + \tau) + u_{reflectat}(t_a) = a \cdot (t_a + \tau) + a \cdot t_a = U_{rez} + \frac{2 \cdot a \cdot l_{AB}}{v}, \quad (5)$$

în care a reprezintă panta tensiunii pe frontul undei, iar U_{rez} tensiunea reziduală la curent nominal a descărcătorului, tensiune practic egală cu tensiunea sa de amorsare.

Odată obținută o relație de forma (5), ea poate fi utilizată în calculele aproximative de verificare a protecției cu descărcător, fără a mai fi necesară realizarea construcțiilor grafice de tipul celor prezentate în figurile 3 și 4. Un astfel de exemplu de calcul este dat în tabelul 1, unde sunt specificate distanțele maxime de instalare dintre descărcătoare și echipamentele protejate. În instalațiile reale, aceste distanțe reprezintă lungimea cumulată a tronsoanelor de bare și a legăturilor flexibile. În acest tabel nu este dată explicit panta tensiunii pe frontul undei, ci durata de front, măsurată din momentul inițial și până în momentul în care contornează izolația liniei pe care s-a produs supratensiunea de trăsnet.

Tabelul 1. Distanțe maxime dintre descărcător și echipamentul protejat

Durata frontului t_f (μ s)	Tensiunea nominală a rețelei (kV)	Date de intrare în calcule	Distanța maximă (m) de la descărcător la:			
			Transformatoare		Celelalte echipamente	
			marja de siguranță 20 %	marja de siguranță 10 %	marja de siguranță 20 %	marja de siguranță 10 %
0,6	110	$U_{50\%iz.LEA} = 698$ kV; DRV-XAD-104 (ASEA), PEXLIM U 096; $U_{rezidual} = 260$ kV; $U_{\text{țin, trafa}} = 450$ kV; $U_{\text{țin, echipament}} = 550$ kV.	12,89	18,70	23,21	30,30
0,8			17,19	24,93	30,95	40,40
1			21,49	31,16	38,68	50,50
1,2			25,79	37,39	46,42	60,60
1,5			32,23	46,74	58,02	75,75
2			42,98	62,32	77,36	101,00
2,5			53,72	77,90	96,70	126,25
3			64,47	93,48	116,05	151,50
0,6	220	$U_{50\%iz.LEA} = 1011$ kV; DRV- XAE-210B (ASEA), EXLIM P 198; $U_{rezidual} = 500$ kV; $U_{\text{țin, trafa}} = 950$ kV; $U_{\text{țin, echipament}} = 1050$ kV.	23,15	31,60	30,27	39,61
0,8			30,86	42,14	40,36	52,82
1			38,58	52,67	50,45	66,02
1,2			46,29	63,20	60,53	79,23
1,5			57,86	79,01	75,67	99,04
2			77,15	105,34	100,89	132,05
2,5			96,44	131,68	126,11	165,06
3			115,73	158,01	151,34	198,07
0,6	400	$U_{50\%iz.LEA} = 1792$ kV; DRV- XAE-360B (ASEA), EXLIM PB 336; $U_{rezidual} = 865$ kV; $U_{\text{țin, trafa}} = 1425$ kV; $U_{\text{țin, echipament}} = 1550$ kV.	13,81	20,97	18,83	26,62
0,8			18,42	27,96	25,11	35,49
1			23,02	34,95	31,39	44,36
1,2			27,62	41,94	37,67	53,24
1,5			34,53	52,42	47,08	66,55
2			46,04	69,89	62,78	88,73
2,5			57,55	87,37	78,47	110,91
3			69,06	104,84	94,17	133,09

Notă: $U_{50\%iz.LEA}$ – tensiunea de conturare la impuls negativ de trăsnet a izolației liniilor electrice aeriene;
 $U_{rezidual}$ – tensiunea reziduală pe descărcător, la curentul nominal de impuls al acestuia;
 $U_{\text{țin, trafa}}$ – tensiunea nominală de ținere la impuls de trăsnet a izolației transformatoarelor de putere și pentru intervalele de aer;
 $U_{\text{țin, echipament}}$ – tensiunea nominală de ținere la impuls de trăsnet a izolației celorlalte echipamente din stațiile electrice de transformare

Pentru cazul în care capacitatea echivalentă se află în aval de descărcător, în sensul de propagare al unde (fig.1,b), se neglijează, pentru început, prezența capacității. În acest fel, se determină variația în timp a tensiunii pe descărcător, în ipoteza simplificatoare a absenței unei unde reflectate, tronsonul de bare de impedanță caracteristică Z_2 fiind considerat de lungime infinită. Schema echivalentă omogenă, cu parametri concentrați, obținută prin aplicarea regulii lui Petersen acestei noi scheme de propagare, este redată în fig.5.

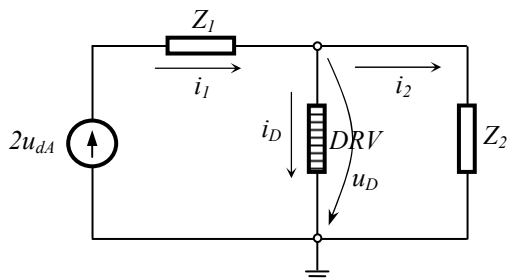


Fig. 5. Schema echivalentă omogenă rezultată prin aplicarea regulii lui Petersen în schema din fig.1,b, în condițiile neglijării capacității concentrate și a reflexiilor de la sfârșitul tronsonului de bare

Sistemul de ecuații care descrie funcționarea circuitului, după amorsarea descărcătorului, este următorul:

$$\begin{cases} 2 \cdot u_{dA} = Z_1 \cdot i_1 + u_D \\ i_1 = i_D + i_2 \\ i_2 = \frac{u_D}{Z_2} \\ u_D = f(i_D) \end{cases}, \quad (6)$$

ultima ecuație descriind caracteristica tensiune-curent a rezistorului nelinear al descărcătorului cu rezistență variabilă. În condițiile în care se face ipoteza simplificatoare a egalității impedanțelor caracteristice ale liniei și barelor ($Z_1 = Z_2 = Z$), sistemul (6) devine de forma

$$\begin{cases} u_{dA} = \frac{Z}{2} \cdot i_D + u_D \\ u_D = f(i_D) \end{cases}. \quad (7)$$

Sistemul de ecuații (7) se rezolvă, la fel ca și sistemul (1), prin metoda caracteristicilor, însă pentru o altă valoare a unei incidente în nodul cu descărcător și pentru alt parametru al primului termen din membrul drept al primei ecuații. Reprezentarea grafică a metodei, aplicate acestui sistem de ecuații, este dată în fig. 6.

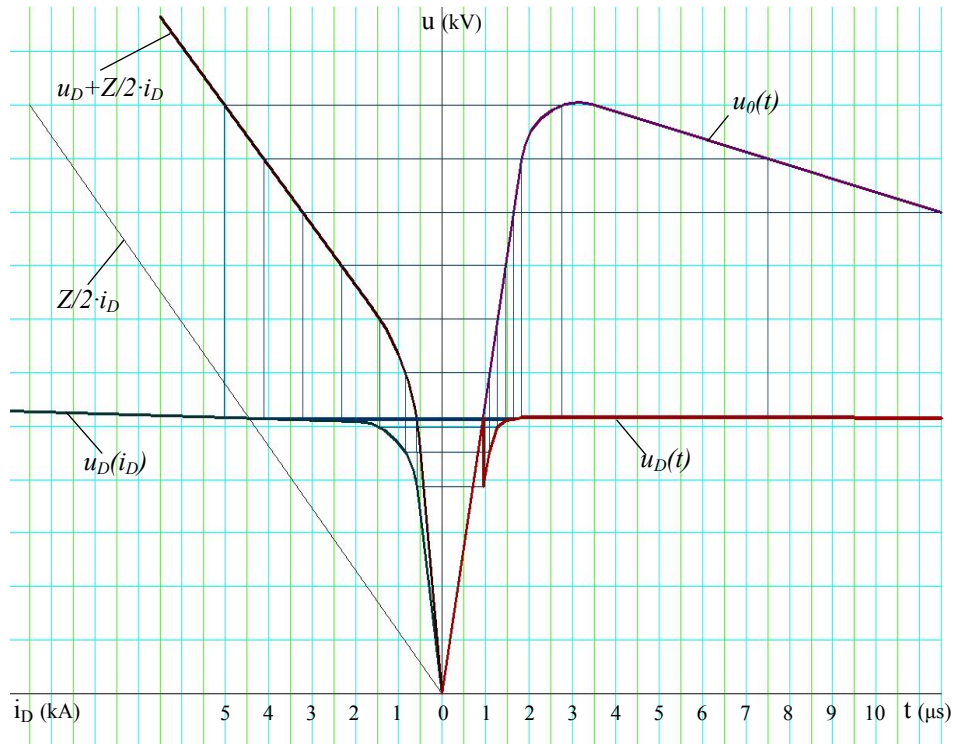


Fig. 6. Exemplu de utilizare a metodei caracteristicilor pentru rezolvarea sistemului de ecuații (7), care descrie funcționarea schemei de propagare din fig.1,b.

În cadranul I al sistemului de axe de coordonate, se obține evoluția în timp a tensiunii de pe descărcător, caracteristica $u_D = f(i)$, în ipotezele simplificatoare adoptate. Această undă de tensiune, impusă de descărcător, devine undă incidentă pentru capacitatea echivalentă de impuls, conform schemei de propagare din fig.7,a, a cărei schemă electrică echivalentă, obținută conform regulii lui Petersen, este dată în fig.7,b.

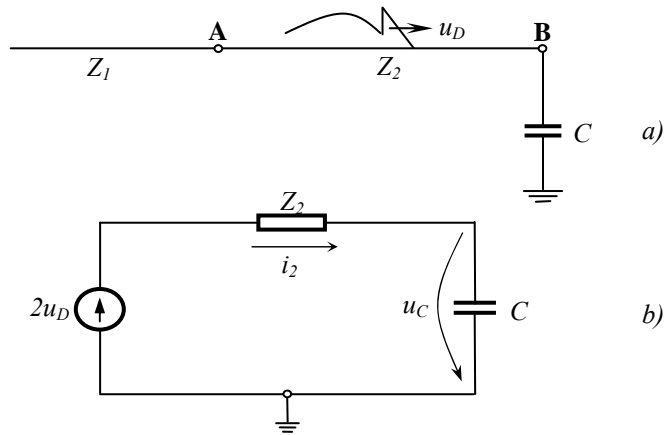


Fig. 7. Schema de propagare pentru determinarea tensiunii pe izolație (a) și scheme echivalentă omogenă rezultată prin aplicarea regulii lui Petersen (b)

În schema electrică din fig.7,b, poate fi scris următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} 2 \cdot u_D = Z_2 \cdot i_2 + u_C \\ i_2 = C \cdot \frac{du_C}{dt} \end{cases}, \quad (8)$$

legea de variație în timp a tensiunii din punctul nodal cu capacitate, $u_C(t)$, urmând a fi determinată prin rezolvarea ecuației diferențiale

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{T} \cdot u_C = \frac{2 \cdot u_D}{T}, \quad (9)$$

în care cu T s-a notat constanta de timp a circuitului, $T = Z_2 \cdot C$.

Undele de impuls de tensiune de trăsnet pot avea forme greu de descris prin funcții relativ simple, cu atât mai mult cu cât sunt afectate de amorsarea descărcătoarelor, de reflexiile multiple din punctele nodale ale schemei și de descărcarea corona de impuls. În aceste condiții, ecuațiile de forma (9) se rezolvă grafo-analitic, prin metoda subtangentei. Un exemplu de rezolvare a ecuației (9) este redat în fig. 8.

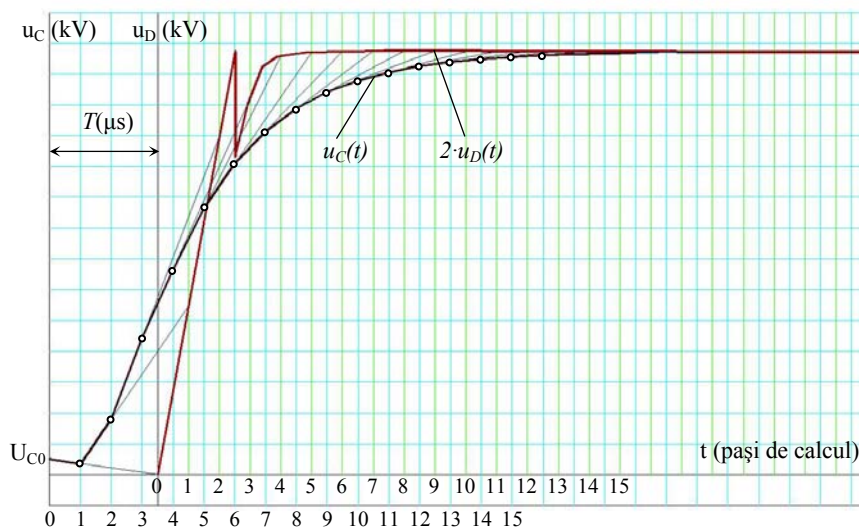


Fig. 8. Exemplu de rezolvare a ecuației diferențiale (9) prin metoda subtangentei

Reprezentarea grafică din fig.8 este făcută în ipoteza în care distanța dintre cele două puncte nodale cu element concentrat (l_{AB}) este suficient de mare încât unda reflectată din nodul **B** să nu deformeze, pe durata efectuării analizei, tensiunea din nodul **A**, și deci unda incidentă pentru nodul **B**. Această ipoteză conduce la

erori mari în calcule, deoarece, în realitate, distanțele dintre descărcătoare și echipamentele protejate sunt relativ mici, așa cum rezultă și din tabelul 1, astfel încât tensiunea $u_D(t)$, așa cum a fost ea reprezentată în fig.7, nu poate fi considerată ca undă incidentă, pe toată durata efectuării analizei. În condițiile în care distanța dintre descărcător și echipamentul protejat ar fi de 100 m, unda reflectată ajunge în nodul **A** după aproximativ 0,67 μ s, în raport cu momentul în care unda incidentă a ajuns în acest nod. Numai pentru acest interval de timp, mult prea scurt pentru a efectua o analiză corectă, forma tensiunii din nodul **A** este impusă exclusiv de către descărcător. În continuare, tensiunea din nodul **A** se obține prin sumarea tensiunii impuse de descărcător cu unda de tensiune reflectată din nodul **B**. Această undă rezultantă devine undă incidentă pentru nodul în care se analizează solicitarea izolației echipamentului.

Pentru obținerea curbei $u_C(t)$ se procedează astfel:

- se trasează două sisteme de axe de coordonate, decalate în timp cu constanta T ;
- se adoptă o aceeași scară a timpului și a tensiunii în ambele sisteme de axe;
- se adoptă valoarea inițială a tensiunii pe capacitate (de exemplu valoare de vârf a tensiunii alternative de frecvență industrială);
- se unesc punctele de pe curbele tensiunilor din cele două sisteme de axe, situate la același moment de timp (sau pas de calcul);
- se trasează un segment de dreaptă paralel cu ordonata la următorul moment de timp, în sistemul de axe de coordonate $u_C 0t$;
- la intersecția acestui segment de dreaptă cu segmentul trasat anterior, între valorile tensiunilor u_c și $2u_D$, se obține valoarea tensiunii u_c în pasul de calcul curent;
- se repetă procedura, până când se obține valoarea maximă a tensiunii u_c , în majoritatea situațiilor fiind suficient să se treacă de primul maxim al acestei funcții.

Adoptarea corectă a intervalului de timp asociat pasului de calcul este esențială în diminuarea erorii. Alegerea unui pas de calcul prea mare poate conduce la neglijarea unor maxime ale tensiunii, așa cum se observă în fig.8, în ceea ce privește vârful de tensiune din zona de amorsare a descărcătorului. Situația din fig.8 nu este de natura a introduce o eroare semnificativă, deoarece acest vârf de tensiune este aplatizat de descărcarea corona de impuls. Aceasta nu înseamnă însă că alegerea unui pas de calcul relativ mare este justificată în toate situațiile. Pasul de calcul trebuie să fie ales funcție de distanța dintre cele două puncte nodale și, implicit, funcție de durata de propagare a undelor pe tronsonul de bare. Chiar dacă cele două sisteme de axe nu sunt decalate cu un număr întreg de pași de calcul, este preferabil ca intervalul de timp asociat pasului de calcul să rezulte prin împărțirea duratei de propagare a undei la un număr natural. Pasul de calcul poate fi egal cu durata de propagare a undei, însă nu trebuie să depășească durata de propagare dus-întors a undelor electromagnetice, pe acest tronson.