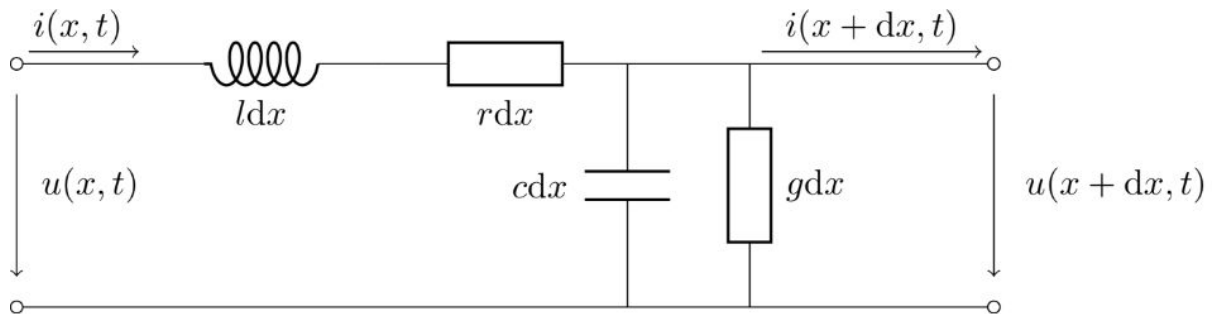


# Tranziensek

1. Ideális, egyfázisú távvezetéken való hullámterjedés jellemző mennyiségei, ezeknek fizikai tartalma. A hullámparaméterek és a vezetékek soros/sönt impedanciái közötti kapcsolat
2. A hullámreflexiók okai és következményei egy-, illetve több-vezetős távvezetéseken. Reflexió-mentes lezárás és Thevenin ekvivalens forrás egy és több fázisú esetben
3. A Bergeron - eljárás ismertetése példa kapcsán. A módszer hullámfizikai származtatása. Feszültség- és áram-időfüggvények megszerkesztése
4. A Bewley - eljárás bemutatása példán, összehasonlítása a Bergeron - módszerrel fizikai kép, alkalmazhatósági korlátok szempontjából. Feszültség- és áram-időfüggvények megszerkesztése.
5. A kapcsolási műveletek törülő hullámmal (cancellation wave) való szimulációjának módszere. A módszer bemutatása egy példa kapcsán
6. A kapcsolási műveletek steady-state hullámokkal való szimulációjának módszere. A módszer bemutatása példa kapcsán
7. Mire használhatók a referencia - áramkörök, melyek a megalkotásuk alapvető szabályai és mitől függ a pontosságuk? (Példákkal illusztrálva)
8. Több véges hosszúságú vezetéket tartalmazó hálózat referencia-kapcsolásának kialakítása, példával alátámasztva
9. Koncentrált induktivitást, illetve kapacitást tartalmazó hálózat referenciakapcsolásának kialakítása, példával bemutatva
10. Hogyan lehet információt kapni a vezeték belső, (a diszkontinuitási pontok közötti) pontjain a tranziens során kialakuló feszültségek és áramokról a Bergeron, Bewley módszerrel, vagy referencia-kapcsolással való számítás esetén?
11. Távvezeték be- és visszakapcsolása során lezajló tranziens folyamatok bemutatása. Az egyes tranziensek hatásának, jelentőségének ismertetése, a folyamatok befolyásolhatósága
12. Kapocszárlat, valamint a kistávolságú zárlat tisztázásának tranziens folyamata. A távolsági zárlat során fellépő tranziensek jelentősége, kapcsolóberendezés igénybevételek
13. A távvezeték veszteségeinek (sodrony ellenállás, földben való hullámterjedés), illetve a sugárzásnak a hatása a hullámterjedés folyamatára
14. Többvezetős (kétvezetős) távvezetéken lezajló hullámterjedés sajátosságai és legfontosabb jellemzői. Mi az egyvezetős rendszerbeli terjedéstől való eltérés fizikai oka? Modusok fogalma, hatásuk két vezető - föld rendszerben. A kétvezetős rendszerre kapott eredmények n vezetőre való kiterjesztésének lehetősége
15. Tekercselt hálózati berendezések (söntfojtók, transzformátorok, motorok állórész tekercse) tranziens feszültség-igénybevételei

**1. Ideális, egyfázisú távvezetéken való hullámterjedés jellemző mennyiségei, ezeknek fizikai tartalma. A hullámparaméterek és a vezetékek soros/sönt impedanciái közötti kapcsolat**



A távvezeték elosztott paramétereit a következők:

L: induktivitás [H/m]

R: soros ellenállás [ $\Omega$ /m]

C: föld és a TV közötti kapacitás [F/m]

G: vezetés a föld és a TV között [S/m]

Minden elosztott paraméter végtelen finoman helyezkedik el a TV mentén, ezért hosszegységre eső értéket vesszük alapul.

Ideális távvezeték esetén  $R=0$ ,  $G=0$ .

A TV helyettesítő képe alapján felírhatóak a távíró egyenletek, amik ideális TV esetén az alábbi formában néznek ki:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -L' \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\frac{\partial i}{\partial y} = -C' \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

Az egyenletek megoldásával a feszültségre és az áramra is egy hullámterjedésre jellemző alakot kapunk:

$$u = f_u\left(t - \frac{y}{v}\right) \text{ és } i = f_i\left(t - \frac{y}{v}\right)$$

Ezeket az egyenleteket tovább visszahelyettesítve a távíró egyenletbe:

$$u = \boxed{F_1^+ \left(t - \frac{y}{v}\right)} + \boxed{F_2^- \left(t + \frac{y}{v}\right)}$$

$$i = \frac{F_1\left(t - \frac{y}{v}\right) - F_2\left(t + \frac{y}{v}\right)}{Z}$$

Az egyenletek azt tükrözik, hogy a transziens folyamatok idején a vezeték bármely pontján két, ellentétes irányú feszültség-, illetve áramhullám halad és a feszültség, valamint az áram ezeknek szuperpozíciójaként alakul ki.

Ha egy derékszöghullám halad át a távvezetéken, akkor az áram, feszültség az alábbi formában írható fel:

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{iL'vdt}{dt} = iL'v$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{uC'vdt}{dt} = uC'v$$

Ezekből adódik a távvezetékben terjedő hullám sebessége:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}$$

Ebből kifejezhető a befutási idő:

$$T = \frac{l}{v} = \sqrt{L' \cdot C'}$$

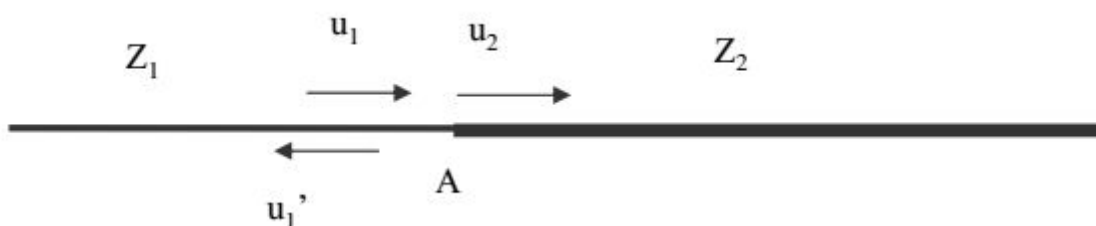
A feszültség és áramhullám adott pillanatra vonatkozó értékének hányadosa:

$$\frac{u}{i} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z$$

Z a vezeték hullámimpedanciája, amely független a vezeték hosszától. Ideális, végtelen hosszú TV hullámimpedanciája ohmos jellegű. Egy TV paramétereit az L, C tag, vagy pedig a T, Z paraméterek határozzák meg, egyik pár ismeretéből kiszámítható a másik kettő.

## 2. A hullámreflexiók okai és következményei egy-, illetve több-vezetős távvezetéseken. Reflexió-mentes lezárás és Thevenin ekvivalens forrás egy és több fázisú esetben

Ha egy Z<sub>1</sub> hullámellenállású vezetéken haladó hullám olyan, ún. diszkontinuitási ponthoz érkezik, ahol az u/i aránynak meg kell változnia (ilyen lehet pl. más hullámellenállású vezetékhez való csatlakozás, elágazás, soros vagy sönt ellenállás), akkor a diszkontinuitási ponton a hullám megváltozott amplitúdóval halad át, illetve ebből a pontból visszavert hullám indul el negatív irányban a Z<sub>1</sub> hullámellenállású vezetéken.



Az áthatoló, illetve visszavert feszültség-, valamint áramhullámok meghatározása érdekében az alábbi egyenleteket lehet felírni:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 \cdot Z_1 \\ u_2 &= i_2 \cdot Z_2 \\ u_1' &= -i_1' \cdot Z_1 \\ u_1 + u_1' &= u_2 \\ i_1 + i_1' &= i_2 \end{aligned}$$

Fenti egyenletekből:

$$u_2 = \frac{u_1 2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \beta_u u_1; \quad i_2 = \frac{i_1 2Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta_i i_1,$$

$\beta$ : áthatolási tényező

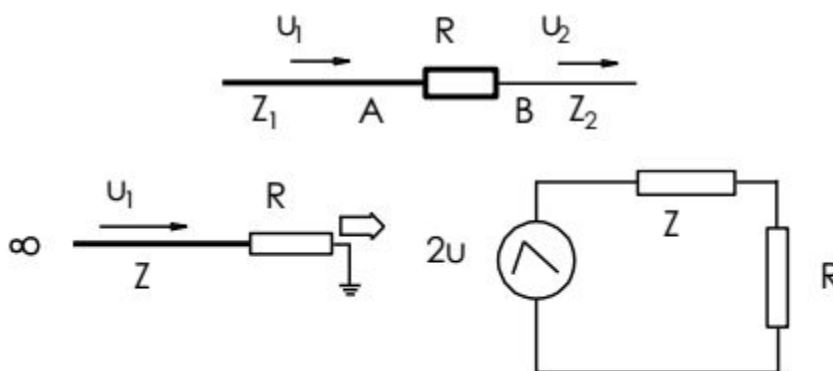
$$u_1' = \frac{u_1(Z_2 - Z_1)}{Z_1 + Z_2} = \rho_u u_1; \quad i_1' = \frac{i_1(Z_1 - Z_2)}{Z_1 + Z_2} = \rho_i i_1,$$

$\rho$ : visszaverődési tényező

$$\beta = 1 + \rho.$$

	Rövidzár $Z_2=0$	Szakadás $Z_2=\infty$	Hullám lezárás $Z_2=Z_1$	Tetszőleges lezárás $Z_2 \neq Z_1$
$\beta_i = 2 \cdot Z_1 / (Z_1 + Z_2)$	2	0	1	$2 \cdot Z_1 / (Z_1 + Z_2)$
$\beta_u = 2 \cdot Z_2 / (Z_1 + Z_2)$	0	2	1	$2 \cdot Z_2 / (Z_1 + Z_2)$
$\rho_i = (Z_1 - Z_2) / (Z_2 + Z_1)$	1	-1	0	$(Z_1 - Z_2) / (Z_2 + Z_1)$
$\rho_u = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$	-1	1	0	$(Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$

Thévenin-elv:



### 3. A Bergeron - eljárás ismertetése példa kapcsán. A módszer hullámfizikai származtatása. Feszültség- és áram-időfüggvények megszerkesztése

(Elektró 2 jegyzet)

A Bergeron-eljárás a tranzienseket a feszültség-áram koordináta-rendszerben vizsgálja.

#### A Bergeron szerkesztés használati feltételei:

- Veszteségmentes távvezeték esetén használható
- A távvezeték bemenetén  $t=0$  pillanatban egyenfeszültség rákapcsolását követően kialakuló folyamatra alkalmazható
- A távvezeték kezdetén és végén adja meg a feszültség és az áram összetartozó értékeit, amikor a hullám éppen ott tartózkodik

#### Kiindulás:

$$U = U^+ + U^- \quad (6.5.-1.)$$

$$I = \frac{U^+}{Z_0} - \frac{U^-}{Z_0} \quad (6.5.-2.)$$

A 6.5.-2. egyenletet szorozzuk meg  $Z_0$ -al, majd adjuk hozzá 6.5.-1.-hez és fejezzük ki  $U$ -t:

$$I \cdot Z_0 = U^+ - U^-$$

$$U + I \cdot Z_0 = 2U^+$$

$$U = 2U^+ - I \cdot Z_0 \quad (6.5.-3.)$$

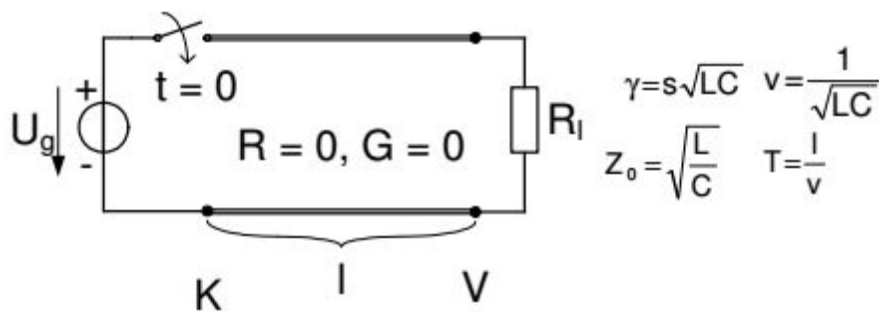
A 6.5.-2. egyenletet szorozzuk meg  $Z_0$ -al, majd vonjuk ki 6.5.-1.-ből és fejezzük ki  $U^-$ -t:

$$U - I \cdot Z_0 = 2U^-$$

$$U = 2U^- + I \cdot Z_0 \quad (6.5.-4.)$$

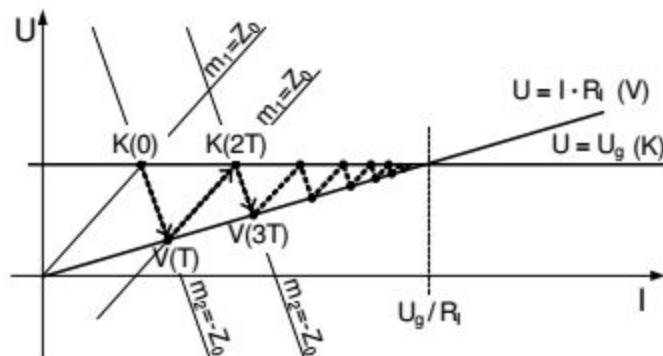
### Feladatok:

- Veszteségmentes távvezeték, ideális egyenfeszültség forrás betáplálással és  $R_1$  lezárással



Ideális feszültségforrást ( $R_g=0$ ) kapcsolunk az  $l$  hosszúságú távvezeték bemenetére a  $t=0$  pillanatban és a távvezeték vége  $R_l$  ellenállással van lezárva.

Első lépés a távvezeték kezdetén ( $K$ ) a feszültség és áram összetartozó értékeit megadó görbe megrajzolása, ami jelen esetben az  $U=U_g$  egyenes, mivel ha a hullám a távvezeték kezdetén van a feszültség az ideális feszültségforrás miatt mindig  $U_g$ . Mivel a távvezeték vége  $R_l$  ellenállással van lezárva, így a távvezeték végére ( $V$ ) vonatkozó görbe egyenlete  $U=I \cdot R_l$  egyenes.



A  $t = 0$  pillanatban a bemenetre ugrásszerűen  $U=U_g$  feszültséget kapcsolunk. Visszavert hullám nincs ( $U^- = 0$ ), ezért a 6.5.-4. egyenletből  $U=I \cdot Z_0$ . A kezdőpontban tehát  $U_g=I \cdot Z_0$ . Megrajzolva az  $m_1=Z_0$  meredekség, origón áthaladó egyenest az  $U=U_g$ -vel való metszéspont lesz a kiindulási,  $K(0)$  pont.

A  $0 < t < T$  intervallumban a szerkesztéshez a 6.5.-3 egyenletet célszerű használni, mivel csak előrehaladó hullám van. Az  $U=2U^+ - I \cdot Z_0$  egyenesnek át kell menni a  $K(0)$  ponton, vagyis rajzolni kell egy  $m_2 = -Z_0$  meredekség,  $K(0)$ -on átmenő egyenest.

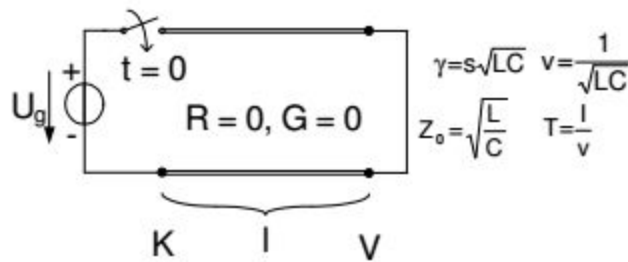
$t = T$  időpillanatban a távvezeték végén az  $U = IZ_0$  összefüggés érvényes, így a  $V(T)$  pont a  $K(0)$  ponton áthaladó egyenes és az  $U = IZ_0$  egyenes metszéspontja.

A  $T < t < 2T$  időtartományban csak visszavert hullám van, ezért célszerű a 6.5.-4. egyenletet használni. Az  $U = 2U + IZ_0$  egyenesnek át kell menni a  $V(T)$  ponton, vagyis rajzolni kell egy  $m_1 = Z_0$  meredekségű,  $V(T)$  ponton átmenő egyenest.

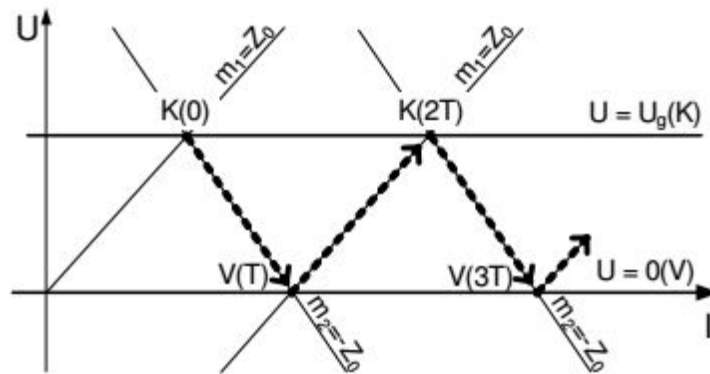
A  $t = 2T$  pillanatban a  $K(2T)$  pontot az előbbi egyenes és az  $U = U_g$  egyenes metszéspontja adja. Innen a szerkesztés menete periódikusan ismétlődik. A 6.5.1.-2. ábra alapján a tranzienst követően kialakuló állandósult áram értéke:

$$I = U_g / R_1$$

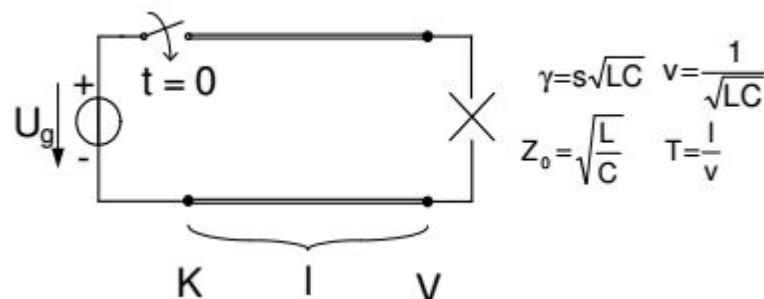
- Veszteségmentes távvezeték, ideális egyenfeszültségű forrás betáplálással és kimeneti rövidzár esetén



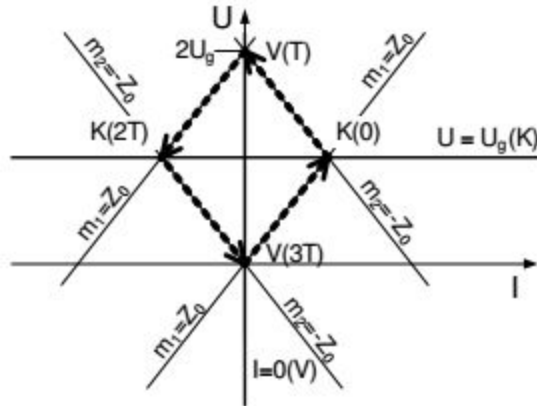
Az előző esethez képest a távvezeték végére (V) vonatkozó határgörbe egyenlete a rövidzár miatt  $U = 0$ . A szerkesztés menete megegyezik az előzőekben leírtakkal. Az ábra szerint az áram fokozatosan tart a végtelen felé.



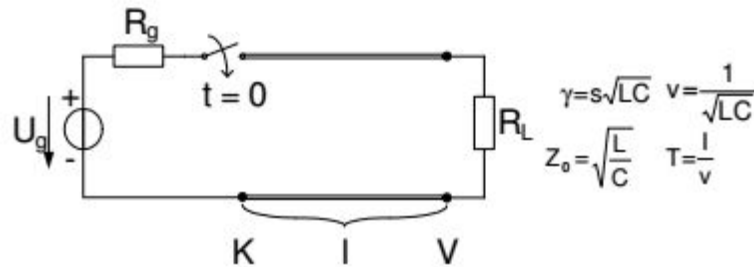
- Veszteségmentes távvezeték, ideális egyenfeszültség forrás betáplálással és kimeneti szakadás esetén



Jelen esetben a távvezeték végére (V) vonatkozó határgörbe egyenlete a szakadás miatt  $I=0$ . A szerkesztés menté megegyezik korábban leírtakkal. Az ábra szerint a távvezeték végén a feszültség 0 és  $2U_g$  között ingadozik:



- Veszteségmentes távvezeték, valós egyenfeszültség forrás betáplálás ( $R_g$ ) és kimeneti  $R_l$  terhelés esetén

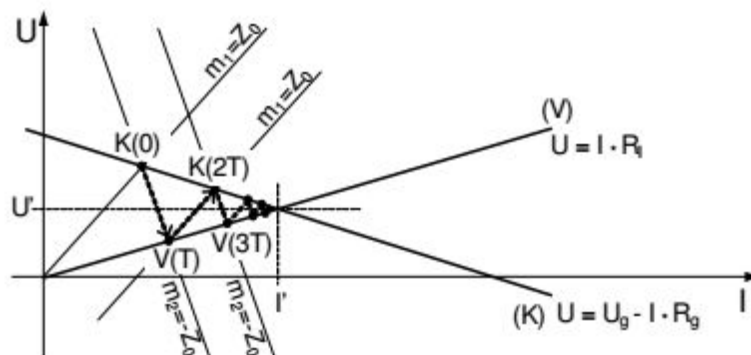


Jelen esetben az előzőekhez képest a távvezeték kezdetére vonatkozó határgörbe egyenlete az  $R_g$  generátor ellenállás miatt  $U=U_g-I R_g$  egyenes. A szerkesztés menté megegyezik a korábban leírtakkal. A 6.5.4.-2. ábra szerint a tranzien folyamat után a távvezeték végén a feszültség:

$$U' = \frac{U_g R_l}{R_l + R_g}$$

és áram:

$$I' = \frac{U_g}{R_l + R_g}$$



### Áram és feszültség időfüggvények:

Az  $U-I$  karakterisztikán megkaptuk a távvezeték végén (V) és kezdetén (K) levő értékeket. A pontok sorrendben követik egymást  $T$  időközönként. Az áram és feszültség időfüggvények felrajzolásához a megfelelő tengelyek metszeteit kell leolvasni. Így megkapjuk az időfüggvények  $n \cdot T$  helyen felvett értékét.

#### 4. A Bewley - eljárás bemutatása példán, összehasonlítása a Bergeron – módszerrel fizikai kép, alkalmazhatósági korlátok szempontjából. Feszültség- és áram-időfüggvények megszerkesztése.

Az eljárás fő vonása és egyben előnye abban áll, hogy a hullámok sorozatos reflexióját az idő függvényében kíséri végig, közvetlenül időfüggvényeket szolgáltat mind az áramra, mind pedig a feszültségre nézve.

A szerkesztés, illetve számítás közben nem tükrözi úgy a tranziens karakterét, mint a Bergeron-eljárás, ez csak a részhullámok szuperponálását követően derül ki.

Hátránya, hogy szerkesztési módszerként kezelése – főleg elágazó távvezetékek esetén – nehézkes.

Jól használható pl. légköri eredetű túlfeszültségek vizsgálatához, mert a villámcsapásból a távvezetésekre kerülő, külső eredetű többlettöltés hullámokat indít el, tehát itt nem az előzményállapotból és kapcsolási műveletből kell kiindulni. A kapcsolási tranziensek tanulmányozásához azonban a Bewley-eljárást csupán úgy lehet használni, ha a kapcsolási művelet hatását hullámmá alakítjuk. A kapcsolási műveletet modellező hullámok létrehozására kétféle eljárás ismeretes: a cancellation wave (érvénytelenítő hullám), illetve steady-state waves (stacioner hullámok) létrehozása.

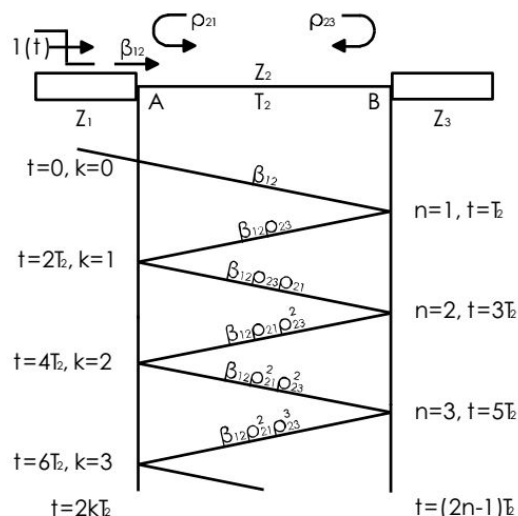
(<https://coherentmusings.wordpress.com/2013/01/>)

#### 5. A kapcsolási műveletek törlő hullámmal (cancellation wave) való szimulációjának módszere. A módszer bemutatása egy példa kapcsán

A cancellation wave feladata az, hogy érvénytelenítse, megsemmisítse a tranziens előtti állapotot és a jellemzőknek (feszültségnek vagy áramnak) a kapcsolási beavatkozás által parancsolt, új értékét valósítsa meg a beavatkozás helyén. Ha a kapcsolási művelet a hálózat két pontjának az összekapcsolását (connection) valósítja meg, akkor a cancellation wave feszültség-hullám, ha szétválasztást (disconnection) történik, akkor áram-hullám. Utóbbit a megszakítóknál fontos jellemzők, főleg a visszaszökő feszültség meghatározásánál elterjedten használják, injektált áram néven.

A cancellation wave alkalmazását illetően fontos megjegyezni (főleg pedig megérteni) egyrészt azt, hogy **a cancellation wave végtelen hosszú**, másrészt pedig azt, hogy az eredményt a kapcsolat előtti stacioner állapot és a cancellation wave által okozott tranziens állapot szuperpozíciója szolgáltatja.

#### Példa:



- A hullámot abból a pontból indítjuk, amelyik áramára vagy feszültségére kíváncsiak vagyunk, vagy a kapcsoló helyéről, ez nem derült ki egyértelműen.

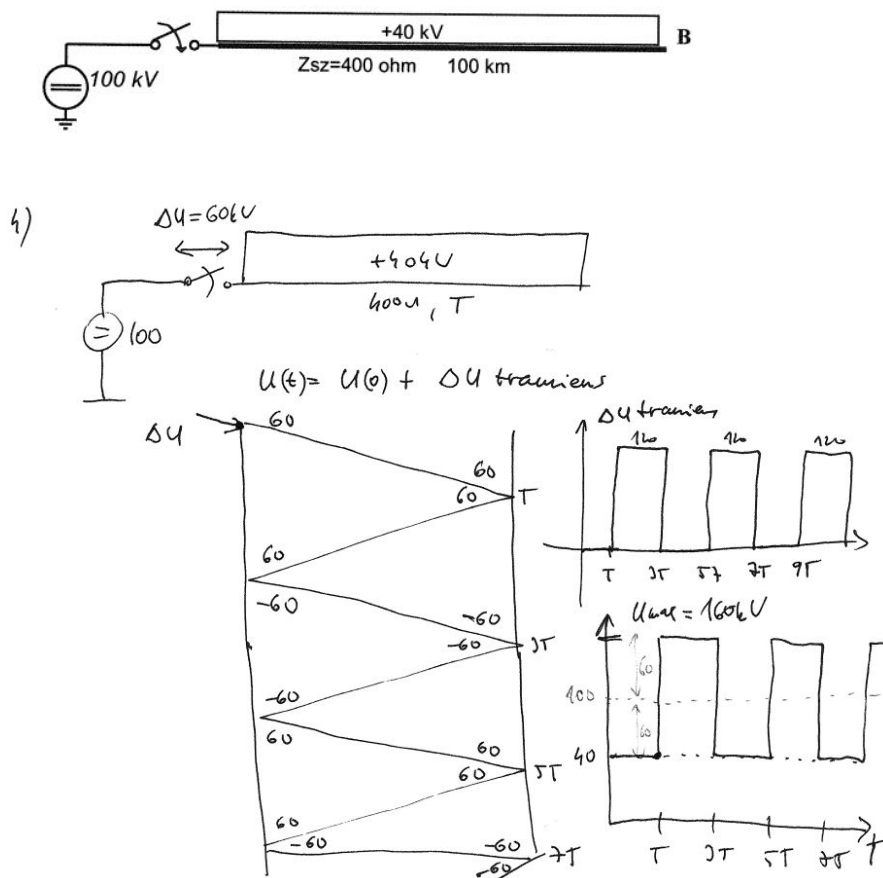


- Az értékek akkorának kell lennie, hogy megszüntesse az állandósult állapot értékeit
- Az elindított hullám minden végponton visszaverődik, meg kell szorozni a megfelelő reflexiós tényező értékével. A kapott értékeket felírjuk a vonalra.
- A keresett végponton úgy kapjuk meg az értéket, hogy összeadjuk az adott időpillanatig keletkezett hullámok értékét, ide kell venni az éppen kilépő hullámot is. Pl: Az ábrán az A oldalra  $k=1$  esetén a kapott feszültség érték a következő lesz:

$$(U_A)_{k=1} = \beta_{12} + \beta_{12}\rho_{23} + \beta_{12}\rho_{23}\rho_{21} = \beta_{12} + \beta_{12}\rho_{23}(1 + \rho_{21})$$

- Ezt a műveletet elvégezzük  $2k \cdot T$  időpontora, így megkapjuk az értékeket a diagramhoz.

Az alábbi veszteségmentes távvezetéken 40 kV feszültség maradt vissza. A törlőhullámok (cancellation waves) módszerével számítsa ki a kapcsoló  $t=0$  időpillanatban történő zárását követően a vezeték nyitott végén (B pont) kialakuló feszültséglengés időfüggvényét 0-8T időpontok között. T a vezeték befutási ideje. A hullámterjedés sebessége a szabadvezetéken 300 m/μs. (10 pont)



## 6. A kapcsolási műveletek steady-state hullámokkal való szimulációjának módszere. A módszer bemutatása példa kapcsán

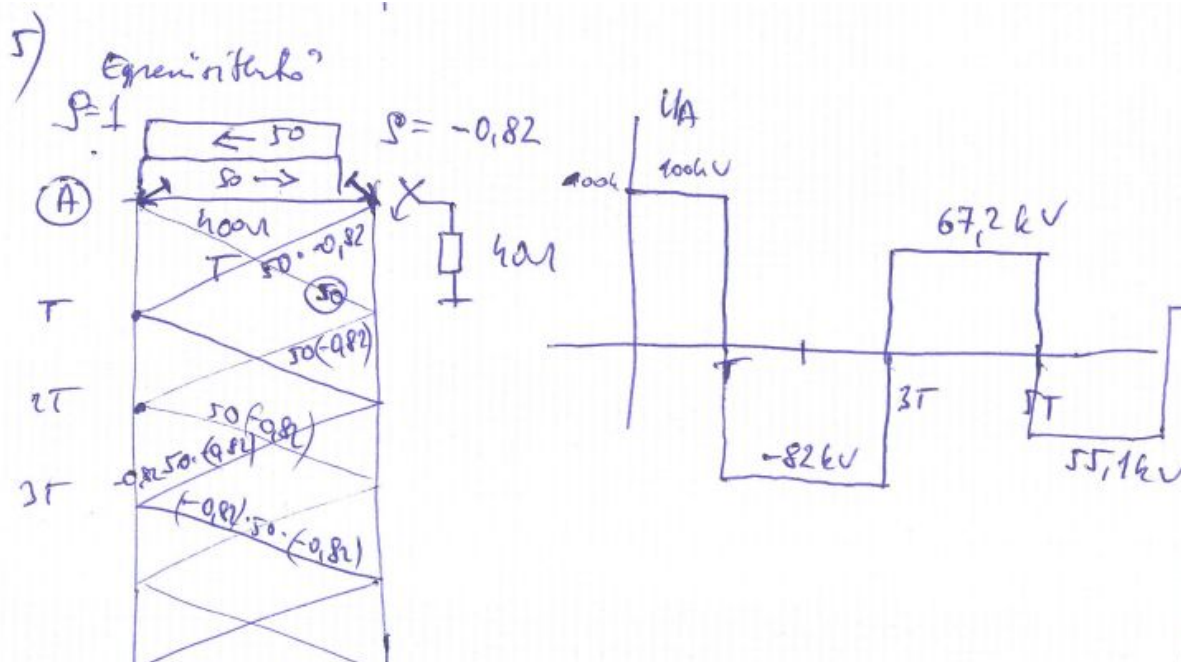
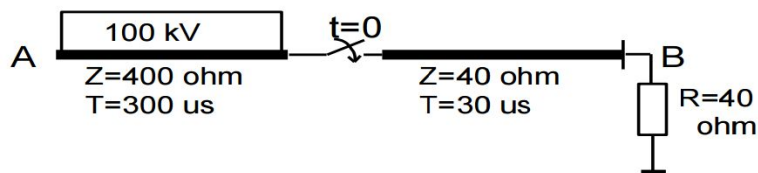
A steady-state waves alkalmazásának alap gondolata az, hogy a távíró egyenletek megoldása természetesen a stacioner folyamatokra is érvényes, így a vezeték bármely pontján a fázisfeszültséget és -áramot két, egymással ellentétes hullám állítja elő. Ha ezeket ismerjük és az állandósult állapot utolsó pillanatát általuk megvalósítottak tekintjük, akkor a kapcsolási művelet hatása csupán a kapcsolás helyén a reflexiós együttható megváltozásaként jelentkezik. A teendő tehát az, hogy a stacioner állapot utolsó pillanatának megfelelő fázisjellemzőjéből rekonstruáljuk a két, ellentétes irányban haladó hullámkomponenst. Fontos megjegyezni, hogy a **steady-state waves hossza a vezeték hosszával azonos.**

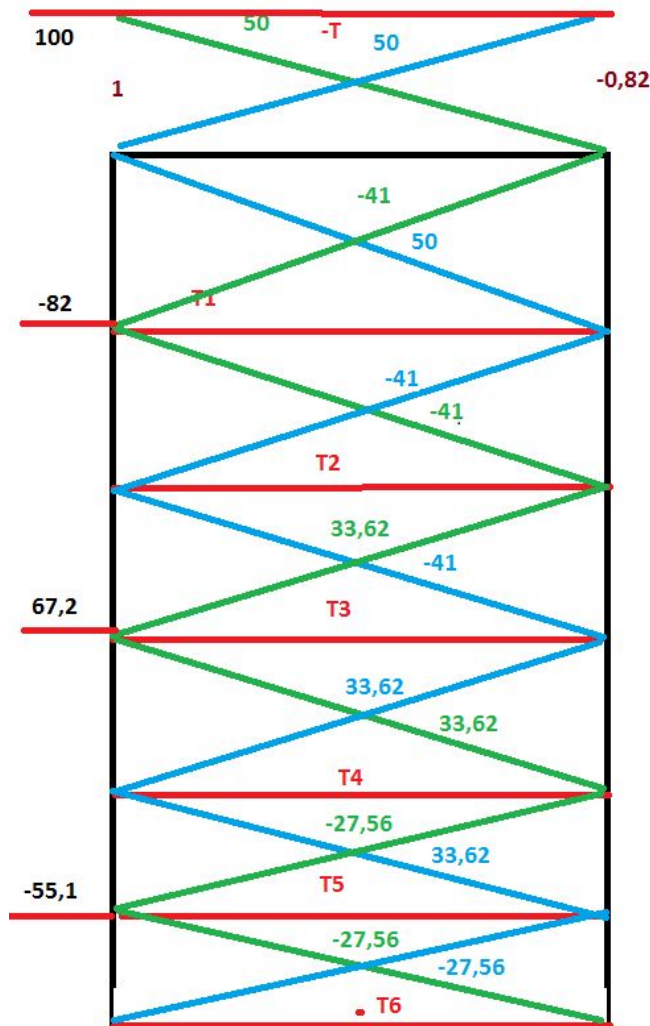
$$U_0 = e_s + e_s' \text{ és } IZ = e_s - e_s'$$

(Ha  $IZ=0$ , akkor  $e_s = e_s'$  csak ilyen volt eddig)

**Példa:**

Az állóhullámok (steady-state waves) módszere segítségével határozza meg a hálózat A pontjának feszültségét a kapcsoló zárását követően.

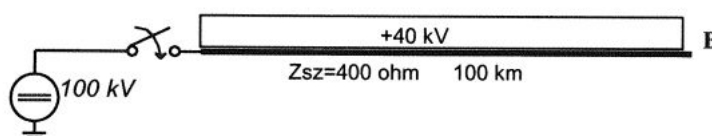


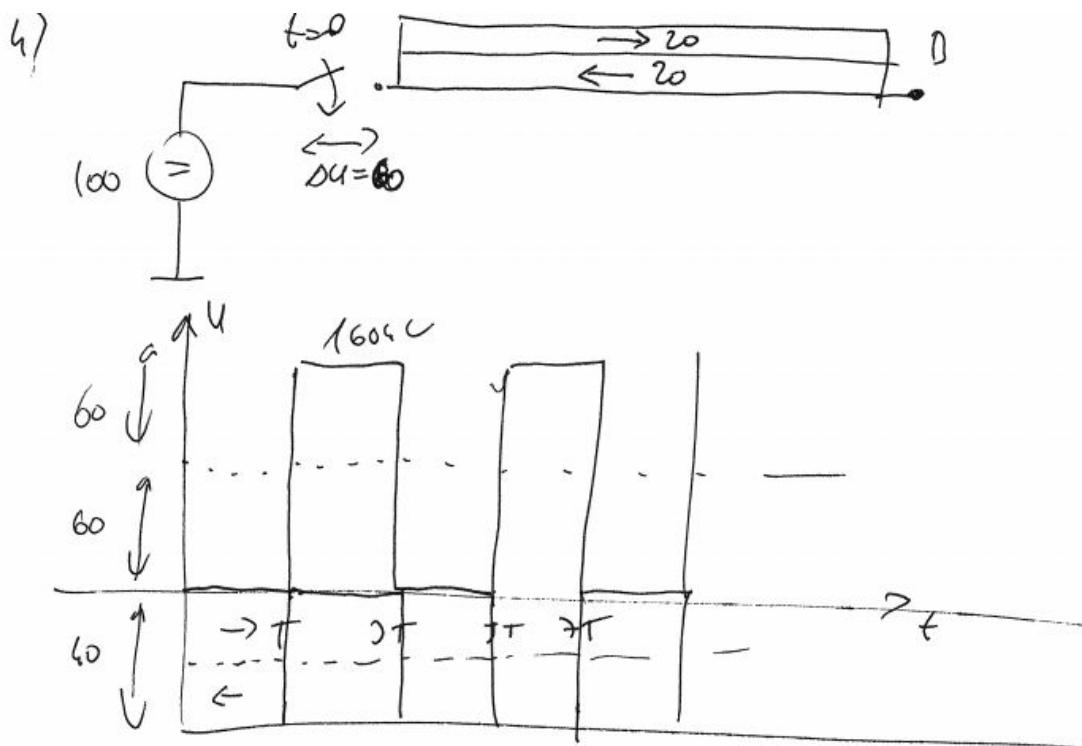


- A hálózat egyszerűsíthető, mivel a 2. távvezeték hullámimpedanciával van lezárva, ezért végtelennek tekinthető, ezért hullámimpedanciával ( $Z_2$ ) helyettesíthető.
- A távvezeték elején és végén ki kell számolni a reflexiók tényezőit. Ügyelni kell arra, hogy áram vagy feszültség hullámot használunk, mivel ez befolyásolja a reflexiók tényező előjelét.
- Meghatározzuk  $e_s$ -t és  $e_s'$ -t
  - Kapcsolás előtt nem folyik áram, ezért  $I_Z=0 \rightarrow e_s=e_s'=U_0/2$
- Elindítjuk a két hullámot és a visszaverődés helyén megszorozzuk az ott érvényes reflexiók tényezővel, ez lesz a vissza vert hullám
- A beeső és a vissza vert hullámok összege adja a keresett amplitudó értékét
  - Mindig a másik oldalról indított hullámot vesszük figyelembe. (jelen esetben zöldet, ami a B pontról indul és az A a keresett)
  - Az A oldalon a reflexiók tényező értéke 1  $\rightarrow$  a beeső és a vissza vert hullám megegyezik, az A pont feszültsége a beeső hullám kétszerese lesz - Csak ennél a feladatnál igaz!

#### Példa 2:

- 4) Az alábbi veszteségmentes távvezetéken 40 kV feszültség maradt vissza. Az állóhullámok (steady-state waves) módszerével számítsa ki a kapcsoló  $t=0$  időpillanatban történő zárását követően a vezeték nyitott végén (B pont) kialakuló feszültség ingás időfüggvényét 0-8T időpontok között. T a vezeték befutási ideje. A hullámterjedés sebessége a szabadvezetéken 300 m/ $\mu$ s. (10 pont)





## 7. Mire használhatók a referencia - áramkörök, melyek a megalkotásuk alapvető szabályai és mitől függ a pontosságuk? (Példákkal illusztrálva)

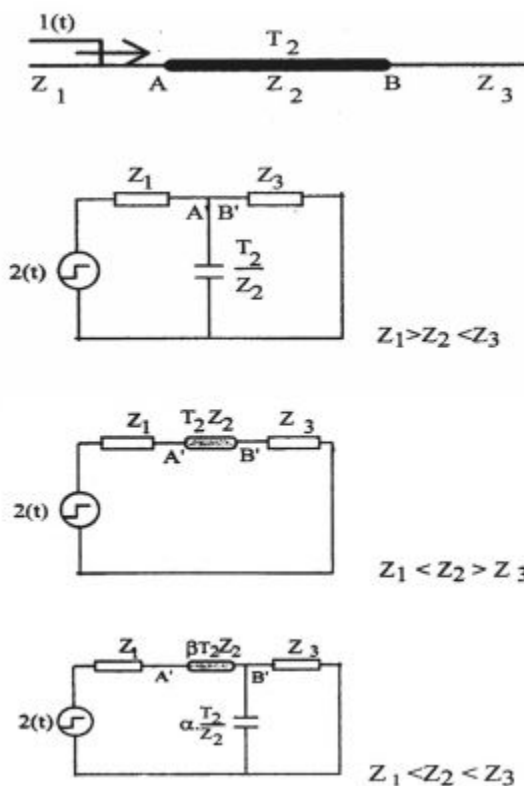
### Alkalmazás:

- Villamos hálózatokban lezajló, bonyolult hullámfizikai folyamatok „visszavezetése” csupán koncentrált elemekből felépített áramkörök tranziens folyamataira. Ez lehetővé teszi a villamos hálózatok tranzienseinek egységesebb szemléletét és bonyolult hálózatokban kialakuló tranziensek fizikájának egyszerűbb megértését.
- A tranziens lefolyásának és hatásainak, a hálózat kritikus helyzeteinek a részletes számításokat megelőző becslése, üzemzavar-analízis.
- A tranziens lefolyását alapvetően meghatározó paraméterek kiválasztása: érzékenységi analízis.
- Pontos gépi számítás-sorozatok paraméter-intervallumának előzetes meghatározása, a számítások eredményeinek ellenőrzése.
- Esettanulmányok eredményeinek általánosítása, hasonlósági invariánsok kimutatása, generalizáló koordinátarendszerek felépítése, kísérlet tervezés.
- Csatlakozó-, illetve háttér-hálózatok modelljeinek egyszerűsítése.
- Villamos energia rendszerek tranziens folyamatainak egyszerű, analóg szimulációval való vizsgálhatósága

### Pontosság:

- Kapacitív vezetéknél: annál jobb a közelítés, mennél kisebb az “a” értéke.
- Induktív vezetéknél: annál jobb a közelítés, mennél nagyobb a “b” értéke.
- Oszcilláló vezetéknél annál jobb a közelítés, mennél kisebb az “a” és mennél nagyobb a “b”.
- Annál jobb a közelítés, mennél rövidebb a szimulálandó vezeték befutási ideje.

## Paraméterek számítása:



**(Generátor feszültsége 2x-es lesz!!!)**

$$\frac{Z_2}{Z_1} = a, \frac{Z_2}{Z_3} = b$$

Azt követeljük meg a referencia kapcsolástól, hogy a rezonancia frekvenciája megegyezzen a távvezeték saját frekvenciájával, így érhető el az, hogy a transziens jelenséget megfelelően kövesse. A rezonancia frekvencia a Thomson képlet segítségével számítható:

$$\frac{1}{2\pi \sqrt{\beta Z_2 T_2 \alpha \frac{T_2}{Z_2}}} = \frac{1}{2\pi T_2 \sqrt{\alpha \beta}} = \frac{1}{4T_2} = f$$

Ez akkor teljesül, ha a  $2 \cdot \pi \cdot T_2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot \beta} = 4 \cdot T_2$ , tehát  $\sqrt{\alpha \cdot \beta} = \frac{4}{2\pi} = 0.4$

$$C = T/Z$$

$$L = T \cdot Z$$

## **Rezgőkörös szimuláció szorzóinak különböző megválasztási módjai:**

1.  $q = \frac{b}{\alpha} + \frac{1}{\alpha\beta}$ , q legyen minimum  $\rightarrow$

$$\alpha = \frac{2}{\pi} \sqrt{ab} \quad \text{és} \quad \beta = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{ab}}$$

2. Fenti két formula nem ad használható eredményt akkor, ha a vezeték egyik végén rövidrezárt, és/vagy másikvégén nyitott. Ezekben az esetekben az alábbi szabályok alkalmazhatók:

$$Z_1=0 \text{ esetén } \alpha=0.5 \text{ és } \beta=0.81$$

$$Z_3=\infty \text{ esetén és } \alpha=0.81 \text{ és } \beta=0.5$$

3. A referencia kapcsolás (rezgőkör) veszteségeit elhanyagolva:

$$\alpha\beta = \frac{4}{\pi^2} \approx 0.4$$

Ha tehát a rezgőkör induktivitását azonosnak vesszük az AB vezeték induktivitásával,

$$\rightarrow \alpha = 1 \rightarrow \beta = 0.4$$

Ha az AB vezeték kapacitív jellegű és a fiktív reflexiós koeficiens rezgőkörrel való szimulációt kíván

$$\rightarrow \beta = 1 \rightarrow \alpha = 0.4$$

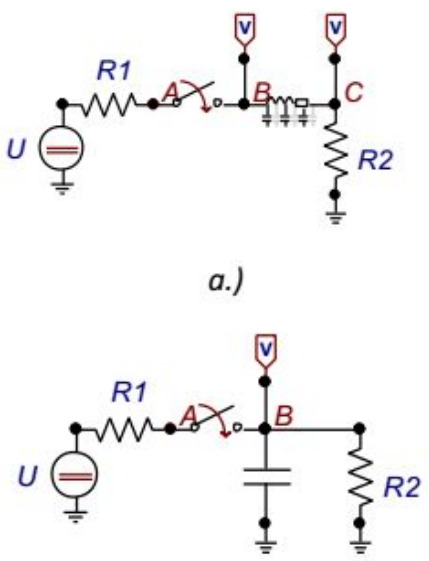
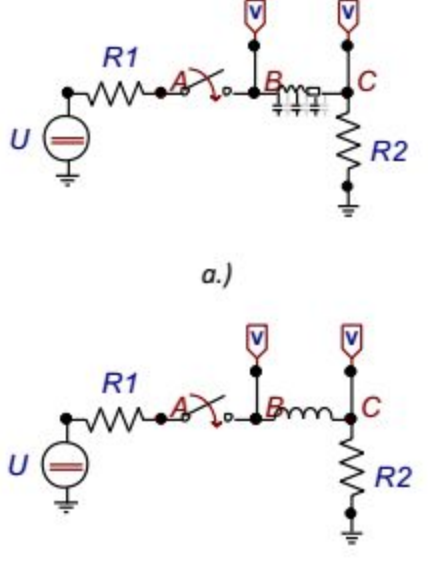
### **Kiterjesztés tetszőleges jelalakra: (Következmény)**

1. Amennyiben a hálózat valamely pontjára a hálózaton, illetve a referenciakörben kialakuló, megfelelő (feszültség-, illetve áram-) görbéket egymásra rajzoljuk, a referenciakör folyamatos görbéi a hálózat lépcsős görbéit minden lépcsőben legalább kétszer metszik. Ez a megállapítás azért fontos, mert tulajdonképpen azt mondja ki, hogy a referenciakör görbéje nem távolodhat el lényegesen a hálózat által produkált görbétől.
2. A hálózat valamely pontjára felrajzolt hálózati, illetve referenciaköri görbék úgy metszik egymást, hogy a két görbe közötti, előjelesen vett területek  $2T_2$  időintervallumon belül kiegyenlítik egymást. Ennek a megállapításnak az a fizikai jelentése, hogy bár a vezeték egyes pontjaihoz a sorozatos visszaverődésekből származó elemi hullámok ugrásszerűen szállítanak töltést, a referenciakör elemei viszont folyamatosan kapják a töltést, s így a kétféle töltésmennyiség  $2T_2$  időintervallumokra vett értéke azonos. A referenciakörök különböző hullámalakokra való használhatósága szempontjából a fenti megállapítás azt sugallja, hogy a referenciakör által szolgáltatott görbe annál jobban eltér a hálózati görbétől, minél nagyobb a vezetéken haladó hullám változása a vezeték befutási ideje alatt, vagyis minél rövidebb a hullám hossza a vezeték hosszánál.

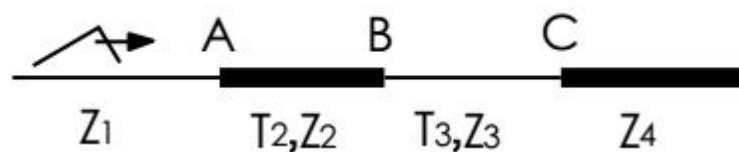
A leírtak szerint rövid impulzus és hosszú vezeték esetén a referenciakör nem ad helyes tájékoztatást. Ugyanakkor a gyakorlatban előforduló vezetékhozzak és a legfeljebb 10kHz nagyságrendű frekvenciákat tartalmazó kapcsolási hullámok okozta tranziensek elemzésére a referencia-áramkörökkel jól használhatók.

### **Példa:**

A vezeték hullámellenállása:	$Z=500 \Omega$
hossza:	$l=300 \text{ km,}$
befutási ideje:	$T=1 \text{ ms}$

 <p>a.)</p> <p>b.)</p>	 <p>a.)</p> <p>b.)</p>
<p>A két határoló ellenállás:  <b><math>R1=2000 \Omega</math></b>, illetve <b><math>R2=3000 \Omega</math></b></p> <p><math>Z1=R1</math> és <math>Z2=Z</math> és <math>Z3=R2</math>  <b><math>Z1&gt;Z2&lt;Z3 \rightarrow</math> sönt kapacitás</b></p> <p>A referencia kondenzátor értéke:  <b><math>C=T/Z2=2\mu F</math></b></p>	<p>A két határoló ellenállás:  <b><math>R1=50 \Omega</math></b>, illetve <b><math>R2=100 \Omega</math></b></p> <p><math>Z1=R1</math> és <math>Z2=Z</math> és <math>Z3=R2</math>  <b><math>Z1&lt;Z2&gt;Z3 \rightarrow</math> soros induktivitás</b></p> <p>A referencia induktivitás értéke:  <b><math>L=T*Z2=500 \text{ mH}</math></b></p>

## 8. Több véges hosszúságú vezeték tartalmazó hálózat referencia-kapcsolásának kialakítása, példával alátámasztva



Ha  $T3>T2$ , akkor úgy vehető, hogy  $T3=\infty$ .

Ha  $T3<T2$ , akkor a következő kompromisszumot alkalmazhatjuk:

AB vezeték referenciakörét első lépésben úgy alakítjuk ki, ahogyan A és B ponti reflexiós koefficiensek megkövetelik. Utána módosítjuk annak érdekében, hogy a referenciakör a  $Z2/Z4$  aránynak is megfeleljen. Eszerint kreálunk egy fiktív reflexiós együtthatót:

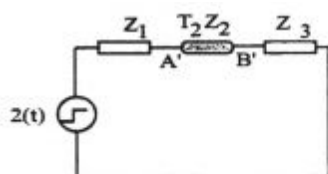
$$\rho_{24} = \frac{Z_4 - Z_2}{Z_4 + Z_2} \quad (\text{táblázatban } \rho_{12})$$

Ebben ez esetben használható az alábbi táblázat:

$\rho_{21} \rho_{23} > 0$				$\rho_{21} \rho_{23} < 0$			
$\rho_{23} > 0$		$\rho_{23} < 0$		$\rho_{23} > 0$		$\rho_{23} < 0$	
$\rho_{12} > 0$	$\rho_{12} < 0$	$\rho_{12} > 0$	$\rho_{12} < 0$	$\rho_{12} > 0$	$\rho_{12} < 0$	$\rho_{12} > 0$	$\rho_{12} < 0$
	$\beta = 0,4$	$\alpha = 0,4$		$\alpha = Z_2/Z_1$ $b = Z_2/Z_1$	$\alpha = 0,4$	$\beta = 0,4$	$\alpha = Z_2/Z_1$ $b = Z_2/Z_1$

**Példa:**

$Z_1 = 10 \text{ Ohm}$   
 $Z_2 = 100 \text{ Ohm}$   
 $Z_3 = 30 \text{ Ohm}$   
 $Z_4 = 150 \text{ Ohm}$



$Z_1 < Z_2 > Z_3 \rightarrow$

$L = T_2 * Z_2$

$Z_1 < Z_2 > Z_3$  , tehát induktivitással helyettesíthető, ahol

Ezután a referenciakört úgy egészítjük ki, hogy az mind  $\rho_{21}$ , mind  $\rho_{23}$ , mind pedig  $\rho_{24}$  visszaverődési együtthatók által megszabott követelmények tendenciájának lehetőleg egyaránt eleget tegyen.

$$\rho_{21} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \rho_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}, \quad \rho_{24} = \frac{Z_4 - Z_2}{Z_4 + Z_2}$$

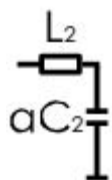
Behelyettesítve, ekkor:

$$\rho_{21} = -0,81 < 0$$

$$\rho_{23} = -0,54 < 0$$

$$\rho_{24} = 0,2 > 0$$

tehát a táblázat alapján:



$\alpha = 0,4$ , ahol

$$C_2 = T_2/Z_2 \text{ és } a = C_2 * Z_2$$

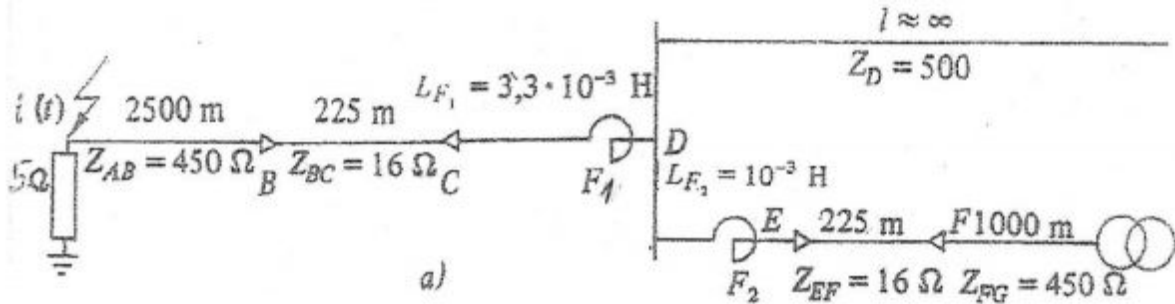
**9. Koncentrált induktivitást, illetve kapacitást tartalmazó hálózat referenciakapcsolásának kialakítása, példával bemutatva**

- Ilyen hálózati konfiguráció esetén ajánlatos a szóbanforgó, koncentrált komponenst átmenetileg vezetékké alakítani.
- Célszerű a koncentrált komponenst helyettesítő vezetéket a vizsgált vezetékkel egyenlő, vagy hosszabb befutási idejűre választani.



- A koncentrált komponens helyettesítő vezeték hullámellenállása egyszerűen informál bennünket arról, hogy a valódi vezeték referencia-áramköre miképpen alakítandó ki.

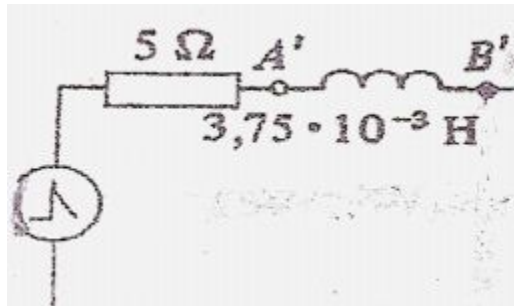
**Példa:**



- $BC < AB$ -nél  $\rightarrow$  AB szakasz helyettesítésébe a C ponti reflexiók is beleszólnak. A 3.3 mH induktivitású fojtótekercest AB-vel azonos, vagy annál hosszabb vezetékké alakítjuk:

- $T_{AB} = (2500\text{m}) / (300\text{m}/\mu\text{s}) = 8.33 \mu\text{s}$ .
- Ezzel  $Z_{F1} = L_{F1} / T_{AB} = 400 \text{ ohm} < 450 \text{ ohm}$ .
- Ennélfogva AB szakasz induktív jellegű:
  - $L_{AB} = Z_{AB} \cdot T_{AB} = 450 \cdot 8.33 \cdot 10^{-6} = 3.75 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

- 5 Ohm: ívellenállás



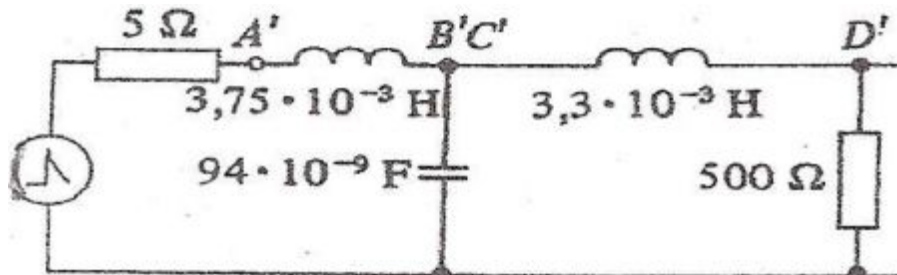
- BC kábel rövid, hullámellenállása kicsi (a mellette levőkhöz képest)

- Helyettesítése: kapacitással:
  - Kábelen a terjedési sebesség: 150 m/us
  - $T_k = (225\text{m}) / (150\text{m}/\text{us}) = 1.5 \mu\text{s}$
  - $C_k = T_k / Z_k = 1.5 \mu\text{s} / 16 \text{ Ohm} = 94 \text{ nF}$

- Az  $L_{F1}$  fojtó helyettesítése egy azonos értékű induktivitás

- D ponton két leágazás van:

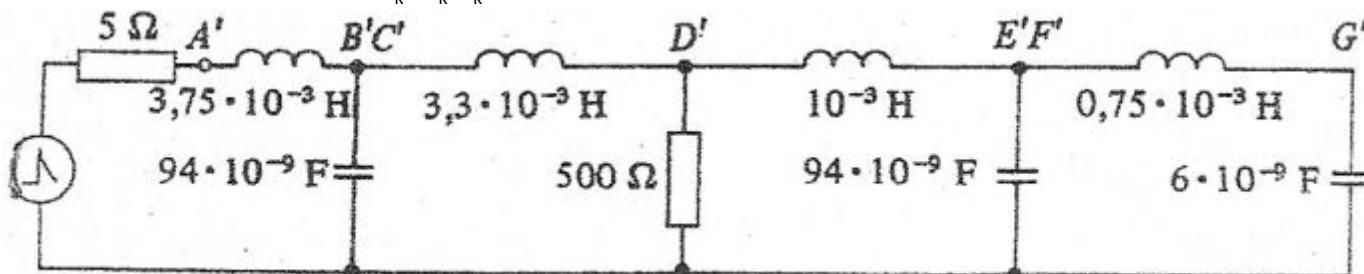
- Az 500 ohm hullámellenállású, végtelen hosszú vezeték megfelelője egy 500 Ohmos sönt



- A másik ágon:

- FG vezeték helyettesítéséhez szükséges az F2 fojtó tekercs impedanciája:
  - $T_{FG} = (1000\text{m}) / (300\text{m}/\text{us}) = 3.33 \mu\text{s}$
  - $Z_{F2} = L_{F2} / T_{FG} = 1\text{mH} / 3.33 \mu\text{s} = 300.3 \text{ Ohm}$
  - Az FG vezeték lezárása egy transzformátor, amely nagy impedanciás lezárást jelent:
    - $Z_3 = Z_{tr} \sim 10\text{kOhm} \rightarrow$  tekinthető végtelennek!

- Így a helyettesítő képe egy LC rezgőkör:
  - $Z_3 = \infty$  esetén és  $\alpha = 0.81$  és  $\beta = 0.5$
  - $L' = \beta * L = \beta * T_{FG} * Z_{FG} = 0,5 * 3.33 \text{ us} * 450 \text{ Ohm} = \mathbf{0,75 \text{ mH}}$
  - $C' = \alpha * C = \alpha * T_{FG} / Z_{FG} = 0,81 * 3.33 \text{ us} / 450 \text{ Ohm} = \mathbf{6 \text{ nF}}$
- EF kábel két nagy impedanciájú kábel között van, ezért sönt kondenzátorral helyettesíthető:
  - Kábelen a terjedési sebesség: 150 m/us
  - $T_k = (225 \text{ m}) / (150 \text{ m/us}) = 1,5 \text{ us}$
  - $C_k = T_k / Z_k = 1,5 \text{ us} / 16 \text{ Ohm} = 94 \text{ nF}$



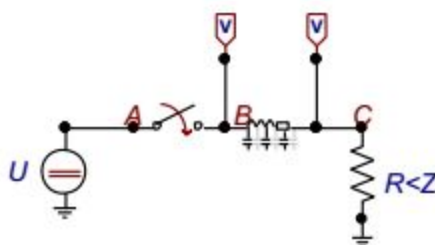
**10. Hogyan lehet információt kapni a vezeték belső, (a diszkontinuitási pontok közötti) pontjain a tranziens során kialakuló feszültségek és áramokról a Bergeron, Bewley módszerrel, vagy referencia-kapcsolással való számítás esetén?**

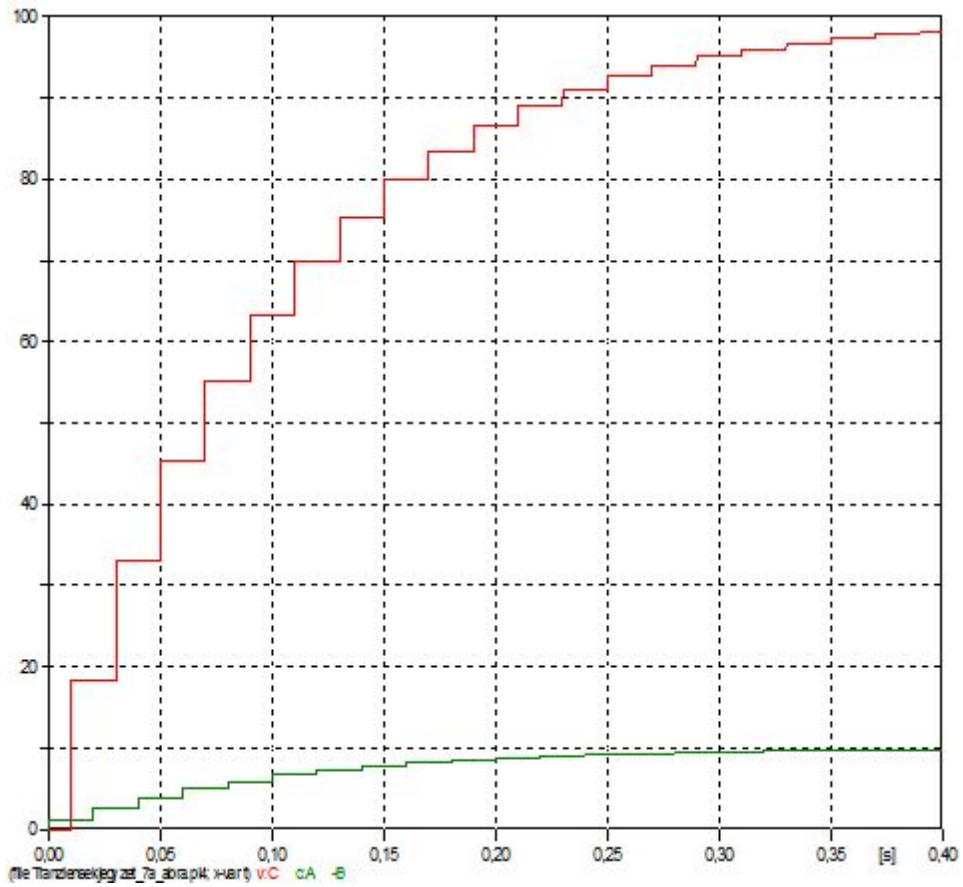
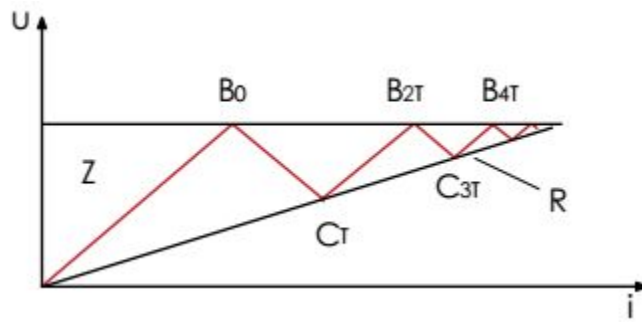
- Bergeron:
  - Nagyon sehogya
- Bewley:
  - Ennél ugye a hullámokat időben ábrázoljuk. Így az A és B pontok között ahol kíváncsiak vagyunk a U vagy I értékekre, akkor abba a pontba behúzzunk egy másik idő-tengelyt, és az ott fellelhető részhullámok szuperpozíciója adja a megoldást.
- Referencia -kapcsolás:
  - ha C, akkor az elején és a végén kb. ugyan az a feszültség, ezért közben sem lehet nagyon más
  - ha L, akkor ahogy közeledünk az kívánt ponthoz, úgy nő az értéke (lineárisnak vehető?)
  - ha LC, akkor ott lengés lesz, olyan frekvenciával, mint az eredeti frekvencia (ez nem biztos)

**11. Távvezeték be- és visszakapcsolása során lezajló tranziens folyamatok bemutatása. Az egyes tranziensek hatásának, jelentőségének ismertetése, a folyamatok befolyásolhatósága**

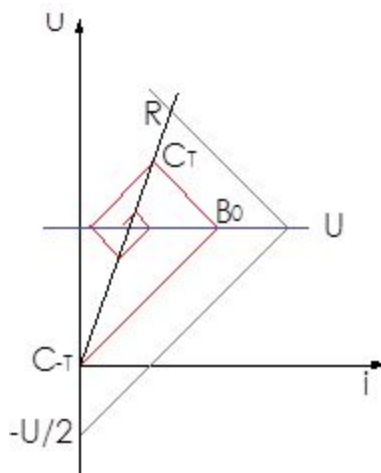
R ellenállással terhelt, Z hullámellenállású és T befutási idejű vezeték t=0 pillanatban való bekapcsolása:

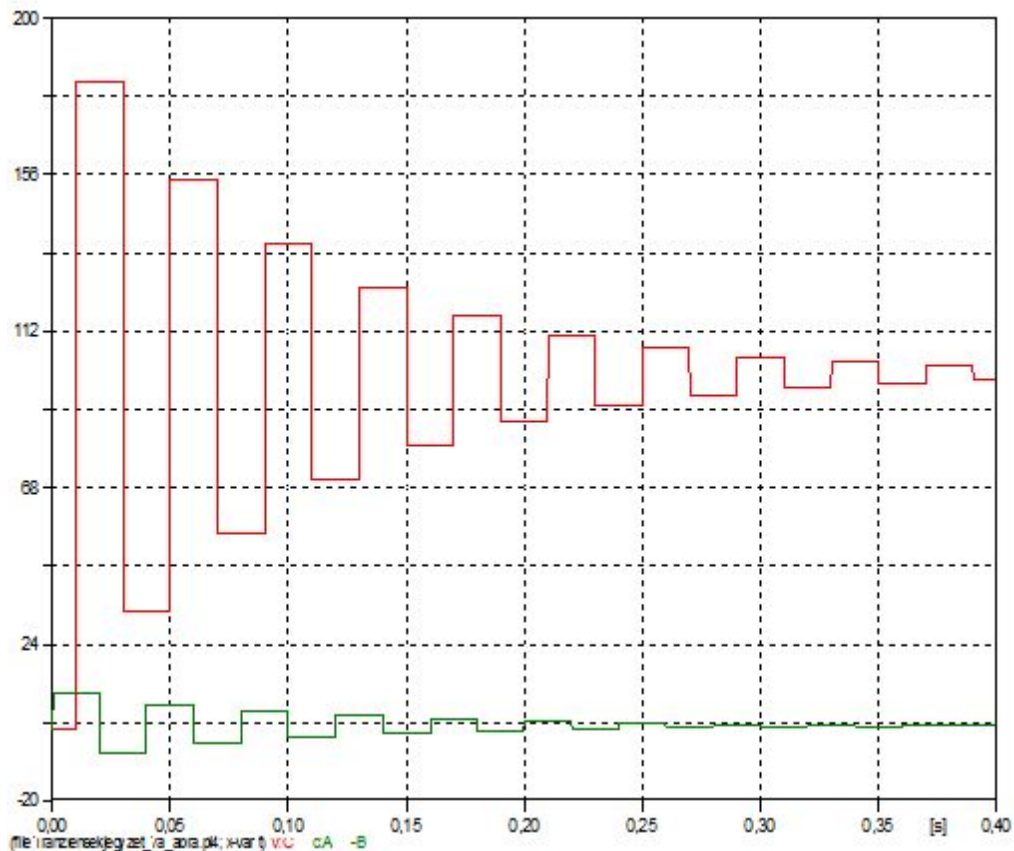
I. eset:  $R < Z$





II. eset:  $R > Z$





### III. eset: $R=Z$

Az  $R=Z$  esetben a szerkesztés a B0 pontnál megreked: a további B és C pontok egyaránt ezen ponttal esnek egybe. Ez a körülmény tükrözi azt, hogy hullámmellenállásával lezárt, tehát végtelenített vezetéken nincs tranziens folyamat.

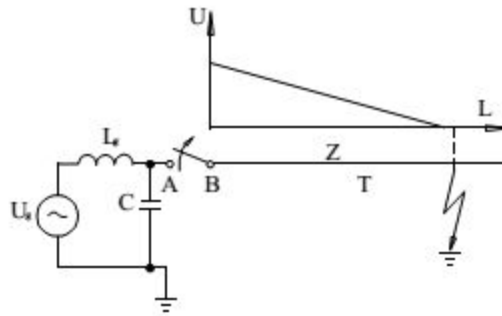
#### **Befolyásolhatósága:**

- A legnagyobb feszültség mindig a nyitott vezetékvégen keletkezik
- 2 p.u.-t meghaladhatja a túlfeszültség maximuma, ha automatikus visszakapcsolásnál a visszamaradó feszültség és a tápoldali gyűjtősin feszültségének a visszakapcsolás pillanatában fennálló polaritása ellentétes.
- Növelheti a visszakapcsolási túlfeszültséget:
  - a távvezetékbe iktatott soros kondenzátoron visszamaradó túlfeszültség
  - a vonali megszakító visszagyújtása kikapcsolásnál
  - a söntkompenzálás, mert az ép fázis(ok)ban visszamaradt töltésnek a söntfojtókon keresztüli kisülése oszcilláló, nagy amplitudójú visszamaradó feszültséget eredményez

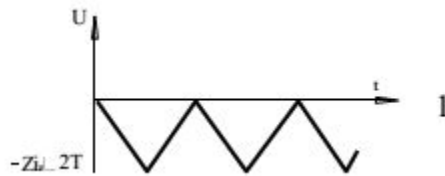
## **12.Kapocszárlat, valamint a kistávolságú zárlat tisztázásának tranziens folyamata. A távolsági zárlat során fellépő tranziensek jelentősége, kapcsolóberendezés igénybevételek**

#### **Kistávolságú zárlat:**

A „kistávolságú zárlatok” kifejezésen a megszakítóhoz közeli zárlatokat (short line faults) értik. Az üzemi tapasztalatok szerint néhány km-es zárlati távolságok esetén a kikapcsolás nagyobb feladatot jelent a megszakítóra, mint a kapocszárlat megszakítása. Ennek oka a következő példával illusztrálható:



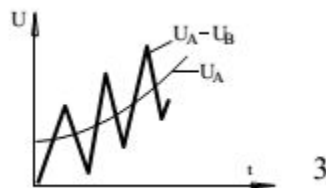
- A kis távolság miatt a söntkapacitás elhanyagolható, emiatt a feszültség lineáris változásúnak tekinthető ezen a szakaszon
- A megszakítás pillanatában B pont feszültsége maximális, a lekapcsolt vezetékszakasz induktív terhelésként jelenik meg.
- Az megszakítón kialakuló  $I_z$  zárlati áram helyére beinjektálandó cancellation wave időfüggvénye :  $i_i = -I_z \sin(\omega t)$
- A feszültség időfüggvénye:  $U_i = -I_z Z \sin(\omega t)$
- Mivel a szakasz rövid, ezért a szinusz helyettesíthető a radiánértékkel, így a feszültségfüggvény:  $U_i = -I_z Z \omega t$ , ami egy állandó meredekségű lineáris függvény.
- Megkonstruálva a Bewley rácshálót, valamint kiolvassva B pont feszültségértékét, az alábbi ábrát kapjuk:



- Ezt szuperponálva a B pont transziens előtti, állandósult feszültség értékére az alábbi ábrát kapjuk:



- A visszaszökő feszültség ennek és az A pontban a földhöz képest mért kisebb frekvenciájú transziens feszültségnek a különbsége:

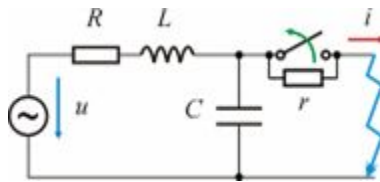


Kistávolságú zárlat esetén a visszaszökő feszültség kezdeti szakaszán a meredekség lényegesen nagyobb, mint kapocszárlat esetén lenne, mivel a távvezeték induktivitása megnöveli ezt a feszültséget. Ez a megszakító termikus visszagyújtásának veszélyét jelenti. Amennyiben a zárlati távolságot növeljük, a fűrészfogak időtartama megnő, ami az amplitúdó növekedése irányában hat.

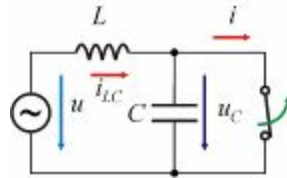
Másrészt a zárlati távolság növekedése a zárlati áramot, s így az injektálandó feszültség hullám meredekségét csökkenti, ami a fűrészfogak amplitúdóját is mérsékeli. A két ellentétes hatás következtében a termikus visszagyújtás veszélyének szélsőértéke (maximuma) van, ami általában 3-5 km távolság közé esik.

### **Kapocszárlat:**

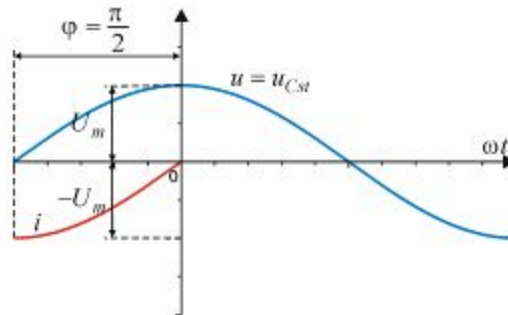
Kapocszárlatnak nevezzük azt, amikor a zárlat a megszakító kapcsain keletkezik, szimulálni a következő modellel lehet:



Nagyfeszültségű kapocszárlathoz az alábbi egyszerűsítéseket tehetjük meg:  $R=0$



A megszakító nullátmenetnél szakítja meg a zárlati áramot. A kialakuló tranziens feszültsége tulajdonképpen a C kapacitás feszültsége lesz, melynek időfüggvénye az alábbi ábrán látható:

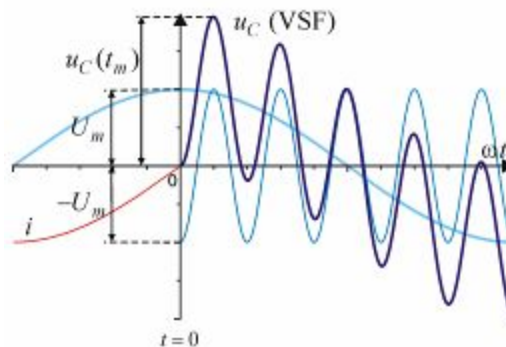


Ezt a feszültséget nevezzük visszatérő feszültségnek, mivel lassan tér vissza az érintkezők közé.

A kondenzátor feszültsége az alábbi képlettel írható le:

$$u_C(t) = u_{Cst}(t) + u_{Ctr}(t),$$

Ahol  $u_{Cst}$  a visszatérő feszültség, az  $u_{Ctr}$  pedig az egyfrekvenciás független visszaszökő feszültség (VSF). Az alábbi ábrán látható a teljes tranziens jelalak.



### 13.A távvezeték veszteségeinek (sodrony ellenállás, földben való hullámterjedés), illetve a sugárzásnak a hatása a hullámterjedés folyamatára

**A hullámterjedésre az alábbi veszteségek lehetnek hatással:**

- a vezetősodronyok ellenállása,
- a szigetelők levezetése,
- a föld véges vezetőképessége,
- a sugárzás.

**A vezetősodrony ellenállása és a szigetelők levezetése:**

	Töltőteljesítmény	Veszteség	A hullám csillapodása
Feszültség hullám	$P_C = \frac{dW_C}{dt} = \frac{1}{2} C' u^2 v.$	$P_G = G' y u^2.$	$u = u_0 e^{-\frac{G'y}{C'v}} = u_0 e^{-\frac{G't}{C'}}$
Áram hullám	$P_C = \frac{dW_L}{dt} = \frac{1}{2} L' i^2 v.$	$P_R = R' y i^2.$	$i = i_0 e^{-\frac{R'y}{L'v}} = i_0 e^{-\frac{R't}{L'}}$

$R'/L'=G'/C'$  esetén a hullámmellenállás ohmos, ettől eltérő esetekben pedig frekvenciafüggő. Erősáramú távvezetésekre a  $R'/L'=G'/C'$  egyenlőség nem teljesülhet. Ennek oka az, hogy a távvezetékek levezetése tranziensek ideje alatt gyakorlatilag zérus. Ezért az erősáramú vezetéseken a vándorhullámok alakja torzul. A torzulás folyamatáról egyszerű képet alkothatunk, ha a veszteséges távvezetékét gondolatban szakaszokra bontjuk, és minden szakaszt veszteségmentes vezetékéből és azzal sorba kapcsolt ellenállásból állónak képzelünk el. A Z hullámmellenállású, veszteségmentes vezetéken balról érkező feszültség hullám az A ponton visszaverődik, és mert  $R+Z>Z$ , a visszavert hullám polaritása a beérkezővel azonos lesz.

Ez azzal a következménnyel jár, hogy a hullámalakok a vezeték szakaszon áthaladva torzulnak, az  $u/i$  hányados (vagyis a hullámmellenállás) folyamatosan változik. Ez alól kivétel azon eset, amikor a két hatványkitevő azonos, vagyis  $R'/L'=G'/C'$ , amiből  $R'/G'=L'/C'=u^2/i^2$ ;

A kitevők azonosságának feltétele eszerint:

$$u^2 G' = i^2 R'$$

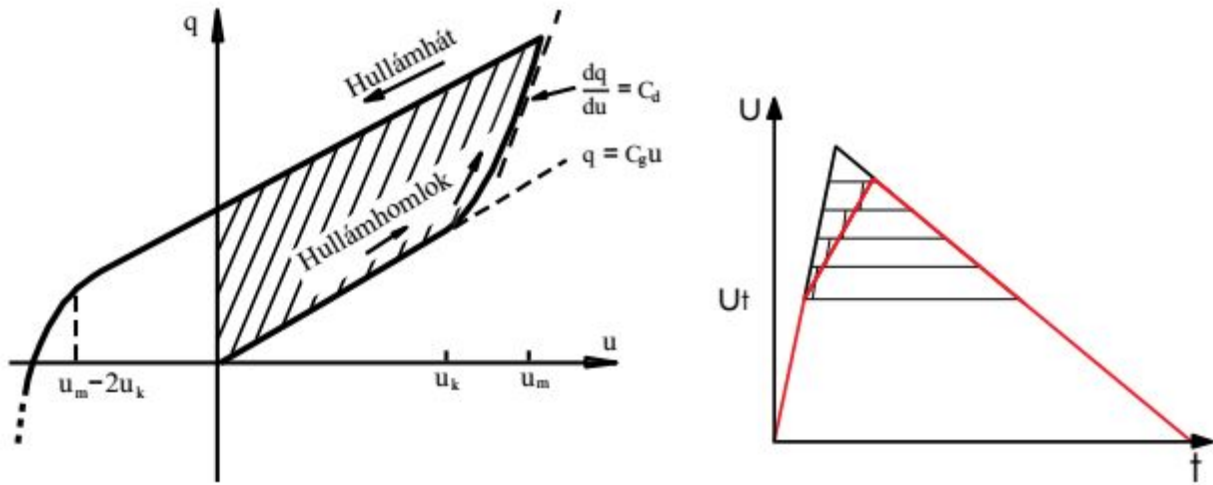
Ennek a feltételnek megfelelő vezeték torzításmentesnek nevezik.

Hasonló feltétel adódik a hullámimpedancia komplex kifejezéséből is:

$$Z = \sqrt{\frac{R'+j\omega L'}{G'+j\omega C'}} = \sqrt{\frac{L'}{C'} \frac{\sqrt{\frac{R'}{L'}+j\omega}}{\sqrt{\frac{G'}{C'}+j\omega}}}$$

### Sugárzás:

Amikor a távvezetéken haladó hullám feszültsége eléri, majd meghaladja a sugárzási küszöbfeszültséget, a vezető körül intenzív ionizációs folyamat alakul ki. A koronaburok nem befolyásolja a vezető induktivitását, ezzel szemben erőteljesen megnöveli a kapacitását. Amikor a vezeték valamely pontján a maximális hullámfeszültséget követő hullámhát halad át, akkor az ott levő vezetéki sönt kapacitásoknak töltést kell leadnia. A vezetővel azonos polaritású töltéseket a vezető taszítja, ezért azok a hullám hátán is távolodnak a vezetőtől. Így a koronaburok töltése nem nyerhető vissza, vagyis a hullámhátan ismét a geometriai kapacitás érvényesül. Monopoláris, nem oszcilláló hullám esetén a bal oldali ábra vonalkázott területe a koronavesztésre jellemző. A jobb oldali ábra a vezeték kapacitás fenti, sajátsejős alakulása miatti hullámtorzulást mutatja.

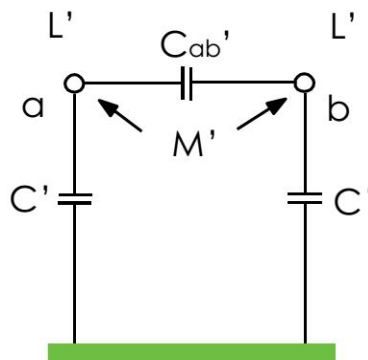


### A sugárzás hatásai a hullámfolyamatokra

- A sugárzás feszültségfüggően csökkenti a vezeték hullámellenállását.
- A sugárzás feszültségfüggően csökkenti a hullám terjedési sebességét. Ezért a hullám homlokát torzítja.
- A hullámalaktól függően csökkenti a hullám csúcsértékét.
- A koronaburok létrejötte, vagyis a kezdeti feszültség erősen függ a sodrony állapotától (korától) és az időjárástól.
- Ezért nem egyszerű feladat a tranziensek számításánál a sugárzást tekintetbe venni (elhanyagolják, vagy becsülik a sugárzás hatását).

### **14. Többvezetős (kétvezetős) távvezetéken lezajló hullámterjedés sajátosságai és legfontosabb jellemzői. Mi az egyvezetős rendszerbeli terjedéstől való eltérés fizikai oka? Modusok fogalma, hatásuk két vezető - föld rendszerben. A kétvezetős rendszerre kapott eredmények n vezetőre való kiterjesztésének lehetősége**

#### Hullámterjedés sajátosságai és legfontosabb jellemzői:



Kétvezetős rendszer esetén a vezetők egymással kapcsolatban vannak, hatással vannak egymásra. Ezt a kapcsolatot szemlélteti a  $C_{ab}'$  átvezető kapacitás, valamint az  $M'$  kölcsönös induktivitás. Ezek mellett mindkét vezetőknek megvan a saját  $L'$  induktivitása és  $C'$  földkapacitása.

A differenciál egyenletek megoldása után azt kapjuk eredményül, hogy egy ilyen rendszerben két különböző amplitudójú hullámpár fut végig a távvezetéken két egymással ellentétes irányba. Ezen hullámpárok sebességét az alábbi képlettel számítható ki:



$$v_{1,2} = \pm \frac{1}{\sqrt{C'(L'+M')}}$$

$$v_{3,4} = \pm \frac{1}{\sqrt{(C'+2C'_{ab})(L'-M')}}$$

Ezek az egyenletek arra utalnak, hogy a két vezetőkben bármely helyen a fázisfeszültségek és áramok megegyeznek, mivel  $V_{1,2}$  ben nem szerepel  $C_{ab}$ , valamint M és L azonos előjelűek. Az ilyen csatornában a hullámpár másik komponense csak a földben haladhat, **föld modulusnak** nevezik. A  $V_{3,4}$  képletében szerepel  $C+2C_{ab}$ , valamint L és M ellentétes előjelűek, ezért ez a hullám egyik komponense az egyik, a másik komponense pedig a másik vezetőkben halad, ez csupán csak a fázisvezetőket veszi igénybe, ezért **vezető modulusnak** hívjuk.

Az eddigiek alapján úgy rekonstruálható a két vezető-föld rendszerben való hullámterjedés, hogy a tranziens kiváltó hatás helyén kialakuló fázisfeszültségek modusbeli (modális) hullámpárokra bomlanak, amelyek különböző sebességgel terjednek saját modulusban. A föld modulusban lassabb a terjedés, ami természetesnek tűnik arra gondolva, hogy a vezető-föld hurok inductivitása sokkal nagyobb, mint a két vezető által alkotott huroké. A vezető modulus sebessége 280–300 km/ms, a föld modulusé 220-230 km/ms határok közé esik.

### Fázisfeszültségek modális hullámokra bomlása

Kapcsoljunk két, szimmetrikusan elhelyezett fázisvezető közé U feszültséget, akkor a két vezetőkön  $\frac{1}{2} U$  és  $-\frac{1}{2} U$  feszültség jelenik meg a földhöz képest. A modális hullámok meghatározása az alábbi egyenletből történhet:

$$U_a = U_0 + U_1$$

$$U_b = U_0 - U_1$$

Jelen esetben mindkét  $U_0 = 0$ , mivel nincs föld modulus ilyen esetben.

Ha a és b vezetőkre U feszültséget kapcsolunk a földhöz képest, akkor a két egyenlet megoldásából  $U_0 = U$ ,  $U_1 = 0$ .

Ha a vezetőkre U feszültséget kapcsolunk, b vezetőket pedig leföldeljük, akkor az alábbi megoldást kapjuk:  $U_0 = U/2$ ,  $U_1 = U/2$

### Hullámellenállások többvezetős rendszerben

Kétvezetős, szimmetrikus rendszer valamelyik fázisvezetőjének bemeneti hullámimpedanciáját az alábbi egyenletrendszerből számíthatjuk:

$$u_a = i_a Z_{aa} + i_b Z_{ab}$$

$$u_b = i_a Z_{ab} + i_b Z_{aa}$$

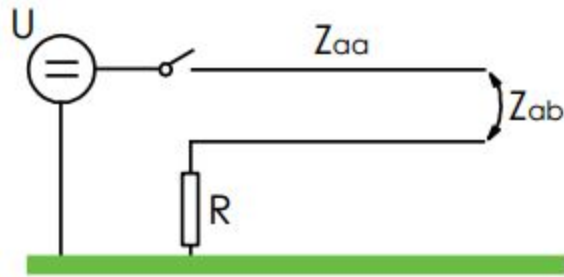
A  $Z_{aa}$  az a vezető saját hullámellenállása, a  $Z_{ab}$  pedig a kölcsönös hullámellenállás. Értékük a következő formulával számítható:

$$Z_{aa} = 138 \lg \frac{2h_a}{r_a},$$

$$Z_{ab} = 138 \lg \frac{f_{ab}}{g_{ab}},$$

Ahol  $h_a$  az a vezető föld feletti magassága,  $r_a$  a sodrony sugara,  $f_{ab}$  az a vezető távolsága a b vezető tükörképétől,  $g_{ab}$  pedig a két vezető közötti távolság.

Nézzük a következő elrendezést:



Az a fázisvezető feszültségét a rákapcsolt egyenfeszültség határozza meg, a b fázisát pedig az  $I_b \cdot R$  feszültségésés, ezek alapján a következő egyenleteket kapjuk:

$$u_a = U = i_a Z_{aa} + i_b Z_{ab}$$

$$u_b = -i_b R = i_a Z_{ab} + i_b Z_{bb}$$

A bemeneti hullámellenállást az a vezetőre kapcsolt feszültség, és az a vezetőre folyó áram határozza meg, értéke kifejezhető a fenti két egyenletből:

$$Z_a = \frac{U}{i_a} = Z_{aa} - \frac{Z_{ab}^2}{Z_{bb} + R}$$

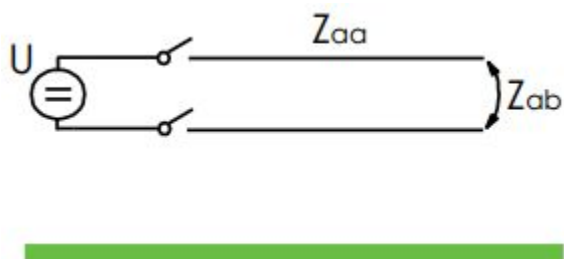
A b fázis csökkenti a bemeneti hullámimpedanciát R ellenálláson keresztül, minél nagyobb R értéke, annál kisebb lesz a bemeneti ellenállás. Ha  $R = \infty$ , tehát a b vezető szabadon lóg, akkor a bemeneti hullámellenállás értéke megegyezik,  $Z_{aa}$ -val, tehát nem befolyásolja a b fázis a hullámterjedést (rövid szakaszon, azonban nagy távolságok esetén már van hatása).

Ha  $i_b = 0$ , tehát nyitott a b fázisunk, akkor a következő egyenletet írhatjuk fel:

$$u_b = \frac{Z_{ab}}{Z_{aa}} u_a$$

Ahol  $Z_{ab}/Z_{aa}$  arány a két vezető közötti csatolási tényező.

Nézzük azt az esetet, amikor a két vezető közé U feszültséget kapcsolunk:



$$\frac{U}{2} = i_a \cdot Z_{aa} + i_b \cdot Z_{ab}$$

$$-\frac{U}{2} = i_a \cdot Z_{ab} + i_b \cdot Z_{bb}$$

Ezekből az egyenletekből kifejezhető a bemeneti hullámimpedancia:

$$Z_1 = \frac{U}{i_a} = Z_{aa} - Z_{ab}$$

$$Z_0 = Z_{aa} + Z_{ab}$$



## 15. Tekercselt hálózati berendezések (söntfojtók, transzformátorok, motorok állórész tekercse) tranziens feszültség-igénybevételei

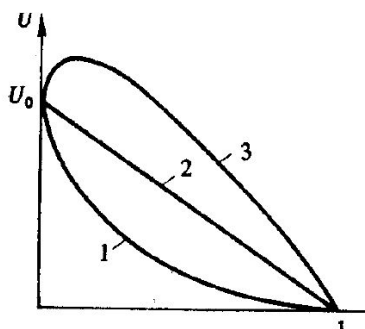
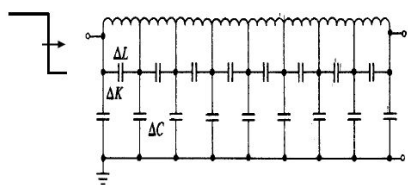
### Tekercsekben lejátszódó tranziensek

Transzformátorok, feszültség- és áramváltók, generátorok és motorok, soros- és söntfojtók. Meghibásodásuk hosszú kiesési időket okozhat.

A menet- és tekercsrész szigeteléseket a túlfeszültségkorlátozók nem védik, ezen szigetelések átütése esetén rövidrezárt menetek keletkeznek, amelyekben igen nagy áramok alakulhatnak ki, tehát ez a jelenség üzemzavarra vezethet.

A menetszigetelések belső szigetelések, ezért általában nem regenerálódnak, így meghibásodásuk a kiesés mellett jelentős javítási költséget is okoz.

### Kezdeti-, tranziens- és végállapot 1.



A földhöz képesti feszültség eloszlása a tekercselés mentén, földelt végpont esetében:  
1-kezdeti eloszlás  
2-végső eloszlás  
3-tranziens eloszlás: a kiegyenlítő lengések burkológörbéje

A kezdeti eloszlást az

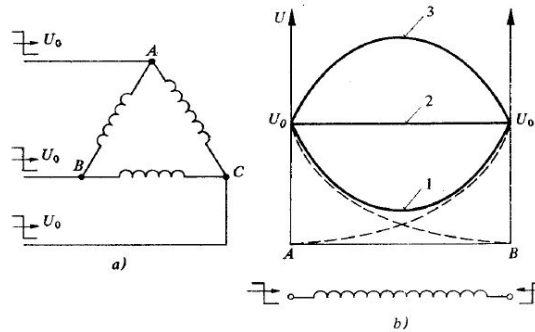
$$u = U_0 e^{-\alpha l}$$

függvény közelíti. Ebben  $\alpha l = \sqrt{C/K}$ , a tekercselés típusának fontos jellemzője,  $l$  pedig a tekercselés menti pontok helykoordinátája.

## Kezdeti-, tranziens- és végállapot 2.

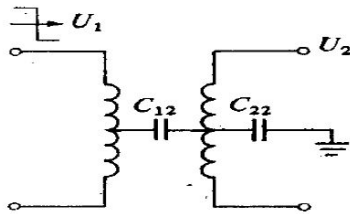
Hullámreflexió meredek homlokú hullám esetén: a tekercselés hatása  $C=(C'K')^{1/2}$  nagyságú söntkondenzátoréval egyenértékű.

Feszültségeloszlás delta kapcsolású tekercselésben:



A földhöz képesti feszültség maximumai a tekercselések közepén alakulnak ki!

- A tekercselés viselkedése a behatoló hullám lassú változásának intervallumban (a hullámháton) vezetékéhez hasonló.
- Levágott hullám hatása a menetszigetelések igénybevételére.
- A kezdeti eloszlás okozta veszélyes igénybevételt csökkenti:
  - kábeles bevezetés,
  - a tekercsrészekkel parallel kapcsolt kondenzátor,
  - kevertmenetű tekercselés.

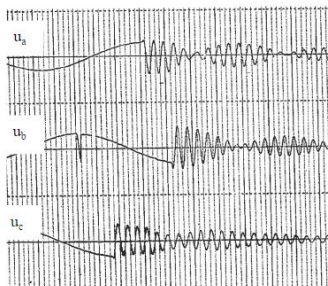


A vasmag mágneses jellemzői a meredek hullámhomlok idején nem érvényesülnek, mert az örvényáramok megakadályozzák a fluxusnak a vasba való hatolását. A mágneses tulajdonságok 6-10  $\mu$ s elteltével kezdenek szerepet játszani.

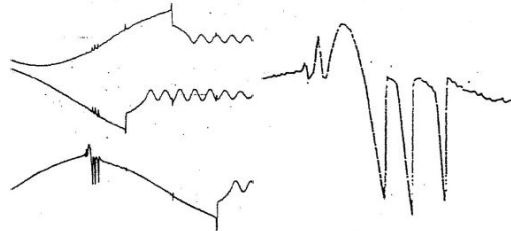
Meghibásodási kockázatra való tervezés?

## Söntfojtók kikapcsolása

A megszakítás hasonló tranzienszt produkál, mint kistávolságú zárlat kikapcsolása a vezetéki oldalon! A lebegés oka a fázisok közötti csatolás a gyűjtősín-szakaszon (modális lengések különválása).



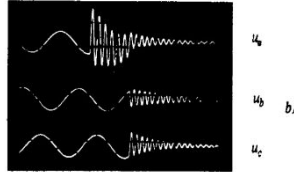
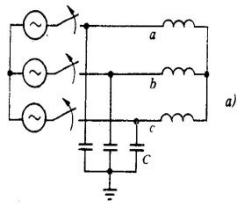
Kikapcsolás korszerű  $SF_6$  oltóközegű megszakítóval



Kikapcsolás régebbi konstrukciójú, légnyomásos megszakítóval

**Vezérelt megszakító működtetés!**

# Motorok kikapcsolási tranziensei



Háromfázisú motorok kikapcsolási tranziense

a) helyettesítő kapcsolás; b) a tranziensek alakulása áramlevágás nélküli

A megszakító jelentős áramlevágást produkált az elsőnek megszakító a fázisban, ezért nagy oltási csúcs alakult ki.

A b és c fázisban – a viszonylag nagy kábelhossz, tehát nagy földkapacitás miatt nem azonos pillanatban történt a megszakítás: előbb b, majd pedig c fázisban következett be. Így b fázisban „negatív áramlevágás” történt, vagyis az áram a polaritásváltás után szakadt meg. Ez a viszonylag ritka jelenség 6.8 pu túlfeszültségcsúcsot eredményezett.

