

Техника на висок напон 2

ПРОСТИРАЊЕ НА БРАНОВИ ПО ВОДОВИ

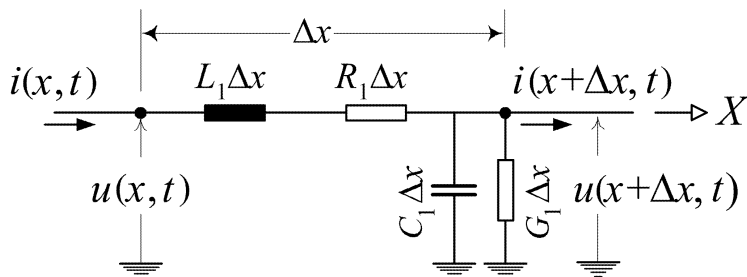
М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2015

Монофазен вод над рамна идеално спроводна земја



Δx - должина на елементарната делница на водот,
 $u(x, t)$ и $i(x, t)$ - моментна вредност на напонот/струјата во
точка со координата x во моментот t ,
 R_1 , L_1 , G_1 и C_1 - подолжни параметри на водот.

Равенки на простирање

$$u(x, t) = u(x + \Delta x, t) + L_1 \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + R_1 \Delta x \cdot i(x, t)$$

$$i(x, t) = i(x + \Delta x, t) + C_1 \Delta x \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} + G_1 \Delta x \cdot u(x + \Delta x, t)$$

$$\Delta u(x, t) = u(x + \Delta x, t) - u(x, t) \quad \Delta i(x, t) = i(x + \Delta x, t) - i(x, t)$$

$$-\Delta u(x, t) = L_1 \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + R_1 \Delta x \cdot i(x, t)$$

$$-\Delta i(x, t) = C_1 \Delta x \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} + G_1 \Delta x \cdot u(x + \Delta x, t)$$

$$\Delta x \rightarrow 0$$

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = L_1 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + R_1 i(x, t)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C_1 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + G_1 u(x, t)$$

Аналитичко решение

Решението на системот диференцијални равенки може да се добие во аналитичка форма само за следните два случаја

- Идеален вод (вод без загуби) кај кој што е исполнет условот $R_1 = 0$ и $G_1 = 0$,
- Хевисајдов вод кај што е исполнет условот $\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1}$.

Во инженерската практика аналитичко решение не е потребно. Проблемот е доволно да се реши нумерички и од решението да се отчитаат максималните напони и струи, нивните стрмини, енергијата во колото и друго.

Равенки на простирање за идеален вод

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &= -L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -L_1 \frac{\partial i}{\partial t \partial x} \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= -C_1 \frac{\partial u}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial i}{\partial x \partial t} = -C_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= L_1 C_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{L_1 C_1} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}} \leftarrow \text{бранова равенка}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

Решение на равенките за идеален вод

$$u(x, t) = f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t - \frac{x}{v} \right) + f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_C} \cdot f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t - \frac{x}{v} \right) - \frac{1}{Z_C} \cdot f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

$$h(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(2h/r)}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

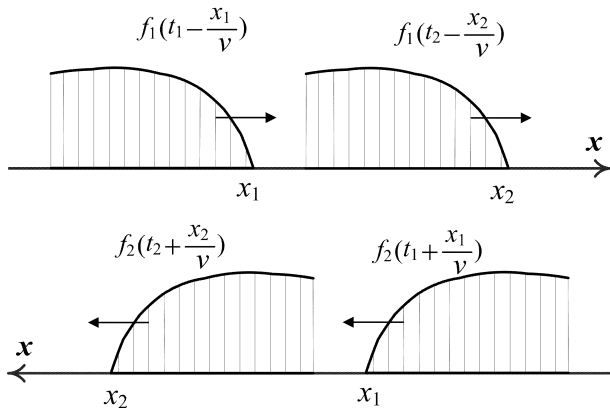
$$Z_C = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 60 \ln \frac{2h}{r} \Omega \left(\begin{array}{ll} 300 \div 500 \Omega & \text{надземни водови} \\ 50 \div 80 \Omega & \text{кабли} \end{array} \right)$$

Со f_1 и f_2 се означени функции со коишто се опишани облиците на брановите што се простираат по водот кон точката со координата x .

Директни и инверзни бранови

- Ако аргументот $(t - x/v)$ кај функцијата $f_1(t - x/v)$ е константен, тогаш и таа ќе е константна,
- За аргументот да биде константен со пораст на времето t треба да расте и координатата x и тоа со брзина v ,
- Функцијата $f_1(t - x/v)$ има природа на бран кој што се простира со брзина v во насока на пораст на координатата x . Овој бран се нарекува **директен бран**,
- Слично се заклучува дека $f_2(t + x/v)$ има природа на бран кој што се простира со брзина v во насока на опаѓање на координатата x . Овој бран се нарекува **инверзен бран**.

Простирање на директни и инверзни бранови



Кај идеален вод облиците на брановите f_1 и f_2 не се менуваат ниту по амплитудата ниту по облик, т.е. тие се простираат без деформации.

Решение на равенките на простирање за реален вод

$$\begin{aligned}u(x, t) &= f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) \cdot e^{-\delta' x} \cdot h \left(t - \frac{x}{v} \right) + \\ &+ f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \cdot e^{-\delta' x} \cdot h \left(t + \frac{x}{v} \right) \\ i(x, t) &= \frac{1}{Z_C} \cdot f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) \cdot e^{-\delta' x} \cdot h \left(t - \frac{x}{v} \right) - \\ &- \frac{1}{Z_C} \cdot f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \cdot e^{-\delta' x} \cdot h \left(t + \frac{x}{v} \right) \\ \delta' &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_1}{Z_C} + G_1 \cdot Z_C \right)\end{aligned}$$

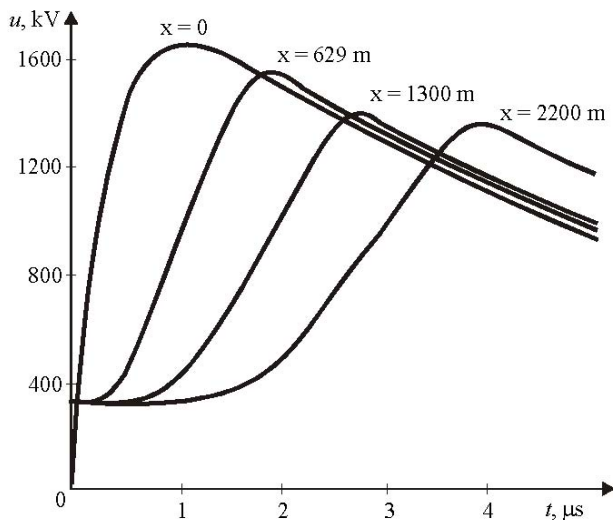
Бранови при простирањето ќе се смалуваат по амплитуда но притоа обликот не го менуваат (**придушување на брановите** при простирањето).

Изобличување на брановите

Во реалноста при простирањето на брановите доаѓа до сложени процеси кои вршат не само придушување туку и изобличување. Главни причини за тоа се

- Спроводноста на земјата зависи од фреквенцијата, а со тоа и параметрите на водот. Поради тоа се појавува **фреквентно изобличување** на брановите,
- При простирањето на бранови по надземните водови доаѓа до појава на **импулсна корона** која ги изобличува брановите поради нелинеарниот карактер на G_1 и B_1 ,
- Доминантна е импулсната корона: бран кој поминал само неколку стотини метри е забележително деформиран.

Изобличување на бран поради импулсна корона



Патувачки бранови

Напоните и струите на водот се збир од два брана кои патуваат во обратни насоки.

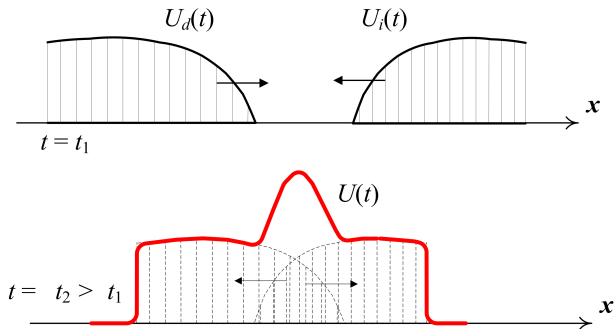
$$\begin{array}{ll} U_d(t) = f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t - \frac{x}{v} \right) & \text{директен напонски бран} \\ U_i(t) = f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t + \frac{x}{v} \right) & \text{инверзен напонски бран} \\ I_d(t) = \frac{1}{Z_C} \cdot f_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t - \frac{x}{v} \right) & \text{директен струен бран} \\ I_i(t) = -\frac{1}{Z_C} \cdot f_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \cdot h \left(t + \frac{x}{v} \right) & \text{инверзен струен бран} \end{array}$$

$$I_d(t) = \frac{U_d(t)}{Z_C}$$

$$I_i(t) = -\frac{U_i(t)}{Z_C}$$

Судир на два патувачки брана

$$U(t) = U_d(t) + U_i(t)$$

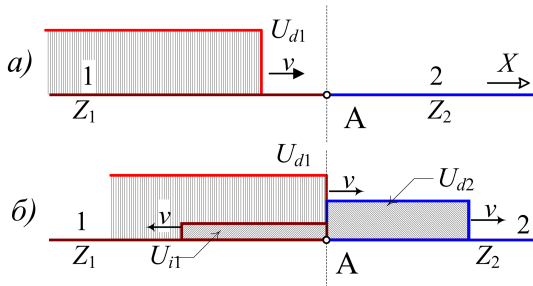


Бесконечно долг вод (многу долг вод)

- Ако десно од местото на разгледување x водот по кој што се простира бранот има бесконечна (или доволно голема должина) нема да има инверзен бран и напонот во точката x ќе биде еднаков само на директниот бран $U(t) = U_d(t)$,
- Односот помеѓу напонскиот и струјниот директен бран што се простира по бесконечно долгиот вод ќе биде $\frac{U_d(t)}{I_d(t)} = Z_C$, т.е. $Z_{vl} = Z_C$,
- Бесконечно долг вод може да се претстави со активна отпорност еднаква на брановата импеданција на водот,
- Секој вод кој е толку долг што инверзниот бран (кој се одбива од неговиот крај) стигна во точката x во момент кој е подоцна од времето за кое ја правиме анализата е бесконечно долг.

Прекршување и одбивање на брановите

Точката A е точка на дисконтинуитет помеѓу два идеални вода со карактеристични импеданции Z_1 и Z_2 .



Кога **упадниот бран** ќе дојде до точката A , дел од него ќе продолжи да се простира по водот 2 и ќе ја нарекува **прекршен бран**, а останатиот дел се одбива од точката A и нарекува **одбиен или рефлектиран бран**.

Равенки во точката на дисконтинуитет

Напоните и струите се зборови од по два брана

$$U_1 = U_{d1} + U_{i1} \qquad I_1 = I_{d1} + I_{i1} = \frac{U_{d1}}{Z_1} - \frac{U_{i1}}{Z_1}$$

$$U_2 = U_{d2} \qquad I_2 = I_{d2} = \frac{U_{d2}}{Z_2}$$

Во точката A напоните и струите се еднакви

$$\begin{aligned} U_{1A} &= U_{2A} & I_{1A} &= I_{2A} \\ U_{d1} + U_{i1} &= U_{d2} & \frac{U_{d1}}{Z_1} - \frac{U_{i1}}{Z_1} &= \frac{U_{d2}}{Z_2} \end{aligned}$$

Решението на последните две равенки е

$$U_{d2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{d1} \qquad U_{i1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{d1}$$

Коефициенти на прекршување и одбивање за напоните

- **Коефициент на прекршување α_{1A}** : Бранот $U_{d2} = \alpha_{1A} U_{d1}$ е прекршениот бран кој е дел од упадниот бран U_{d1}

$$U_{d2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{d1} \Rightarrow \alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

- **Коефициент на одбивање β_{1A}** : Бранот $U_{i1} = \beta_{1A} U_{d1}$ е одбиениот бран кој е дел од упадниот бран U_{d1}

$$U_{i1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{d1} \Rightarrow \beta_{1A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$\alpha_{1A} - \beta_{1A} = 1$$

Коефициенти на прекршување и одбивање за струите

$$\begin{aligned} I_{d2} &= \frac{U_{d2}}{Z_2} = \frac{1}{Z_2} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{d1} = \\ &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot I_{d1} \Rightarrow \alpha_{I,1A} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \\ I_{i1} &= \frac{-U_{i1}}{Z_1} = \frac{-1}{Z_1} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{d1} = \\ &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I_{d1} \Rightarrow \beta_{I,1A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \end{aligned}$$

$$\alpha_{I,1A} - \beta_{I,1A} = 1$$

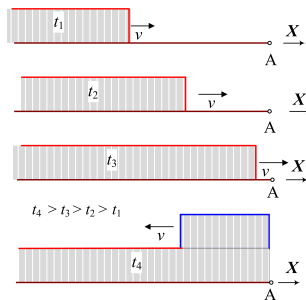
Отворен вод ($Z_2 \rightarrow \infty$)

$$\alpha_{1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 2$$

$$\beta_{1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = 1$$

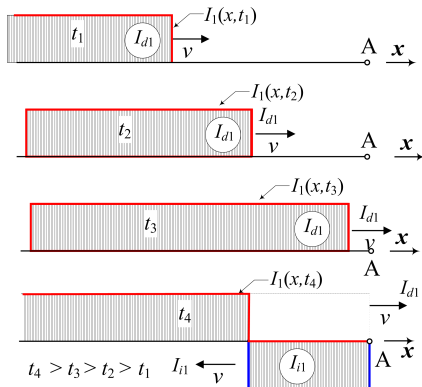
$$\alpha_{I,1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = 0$$

$$\beta_{I,1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = -1$$



Одбиениот бран U_{i1} е еднаков на упадниот, така што по одбивањето напонот ќе биде два пати поголем $U_1 = U_{d1} + U_{i1} = 2U_{d1}$ и така удвоен ќе се шири налево.

Отворен вод ($Z_2 \rightarrow \infty$)



Одбиениот струен бран I_{i1} е еднаков на упадниот но со спротивен знак, така што по одбивањето струјата ќе биде еднаква на нула $I_1 = I_{d1} + I_{i1} = 0$ и нејзината нулта вредност ќе се шири налево.

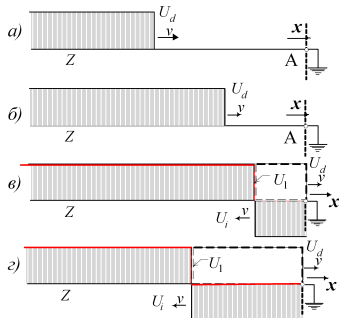
Кусо споен вод ($Z_2 \rightarrow 0$)

$$\alpha_{1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 0$$

$$\alpha_{I,1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = 2$$

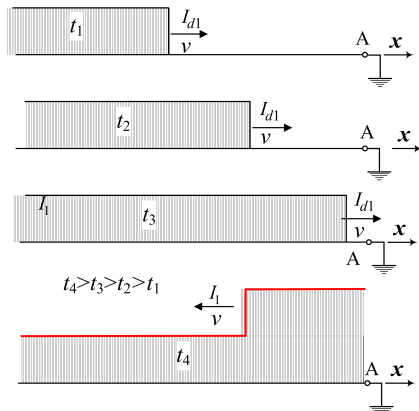
$$\beta_{1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = -1$$

$$\beta_{I,1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow 0} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = 1$$



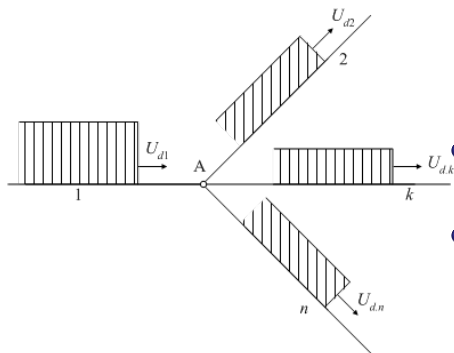
Одбиениот бран U_{i1} е еднаков на упадниот но со спротивен знак, така што по одбивањето напонот ќе биде еднаков на нула $U_1 = U_{d1} + U_{i1} = 0$ и неговата нулта вредност ќе се шири налево.

Кусо споен вод ($Z_2 \rightarrow 0$)



Одбиениот струен бран I_{i1} е еднаков на упадниот, така што по одбивањето струјата ќе биде два пати поголема $I_1 = I_{d1} + I_{i1} = 2I_{d1}$ и така удвоена ќе се шири налево.

Упад на бран на точка на раздел со поголем број водови



- Бран со амплитуда U_{d1} се простира по водот 1 и доаѓа на точка на раздел со водовите 2, 3, ... , n ,
- Водовите се исти $Z_1 = Z_2 \dots = Z_n = Z$,
- Прекршените бранови се исти $U_{d,k} = \alpha_{1A} U_{d1}$, $k = 2, 3, \dots, n$,
- Одбиениот бран е $U_i = \beta_{1A} U_{d1}$.

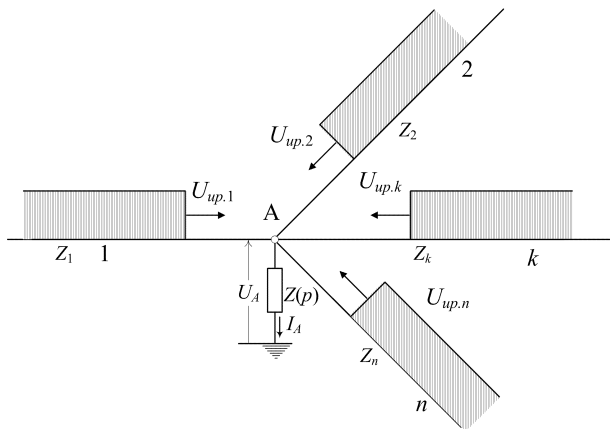
Коефициенти на точката на раздел

$$Z_{ek} = \frac{Z}{n-1}$$
$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_{ek}}{Z_{ek} + Z} = \frac{2}{n}$$
$$\beta_{1A} = \frac{Z_{ek} - Z}{Z_{ek} + Z} = \frac{2-n}{n}$$

Напонот во точката е збир од упадниот и одбиениот бран

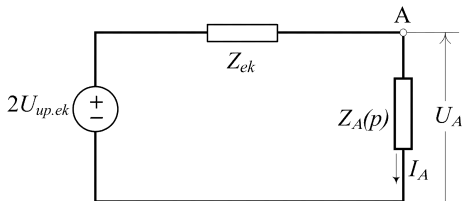
$$U_A = U_{d1} + U_{i1} = (1 + \beta_{1A})U_{d1} = \left(1 + \frac{2-n}{n}\right)U_{d1} = \frac{2}{n}U_{d1}$$

Еквивалентен бран



Во јазелот A во исто време упаѓаат n напонски бранови преку n водови. Во јазелот е приклучен линеарен елемент (кондензатор, калем) даден со $Z(p)$ (нелинеарен елемент се задава со зависноста $u = f(i)$).

Заменска шема за еквивалентен бран



$$Z_{ek} = Z_1 \parallel Z_2 \parallel \dots \parallel Z_n = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k}}$$

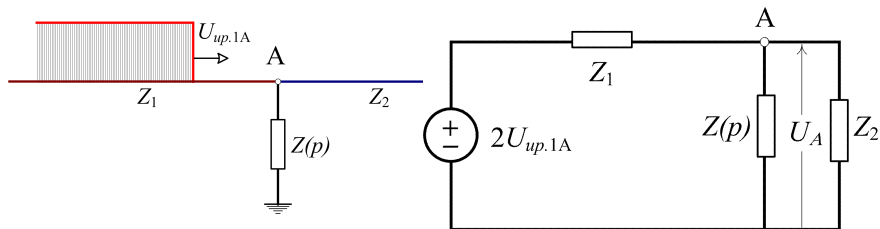
$$E_{ek} = 2 \cdot U_{up.ek} = 2 \cdot Z_{ek} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{U_{up.k}}{Z_k}$$

каде што $U_{up.k}$ е упаден бран по водот k , Z_k е бранова импеданција на водот k .

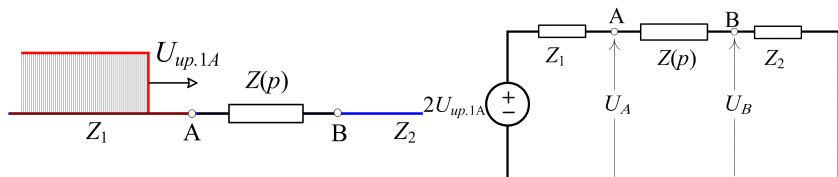
Петерсеново правило

- Сите водови се заменуваат со концентрирани активни отпори чија отпорност е еднаква на нивната бранова импеданција,
- Водот по којшто наидува напонскиот бран или се моделира со напонски генератор,
- Напонот на напонскиот генератор има двојно поголема вредност од вредноста на напонот на упадниот бран,
- Внатрешната отпорност на напонскиот генератор е еднаква на карактеристичната импеданција на водот по којшто наидува бранот,
- Концентрираните елементи во колото се претставуваат со своите операторски импеданции, а така добиената заменска шема нарекува Петерсенова шема (коло).

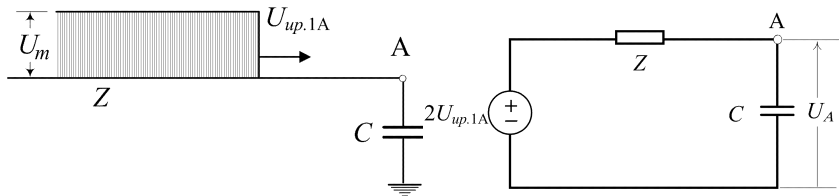
Петерсенова шема (1)



Петерсенова шема (2)



Кондензатор приклучен на крајот од водот

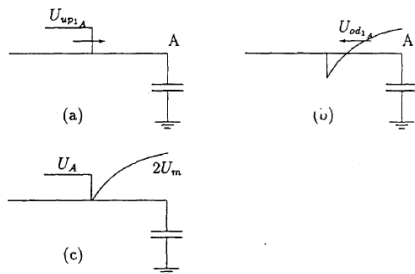


$$U_A(p) = \frac{Z_A(p)}{Z_A(p) + Z} \cdot 2U_{up.1A}(p) = \frac{\frac{1}{pC}}{\frac{1}{pC} + Z} \cdot \frac{2U_m}{p} = \frac{2U_m}{p \cdot (1 + ZCp)}$$

$$u_A(t) = 2U_m \cdot (1 - e^{-t/T}) \cdot h(t) \quad T = Z \cdot C$$

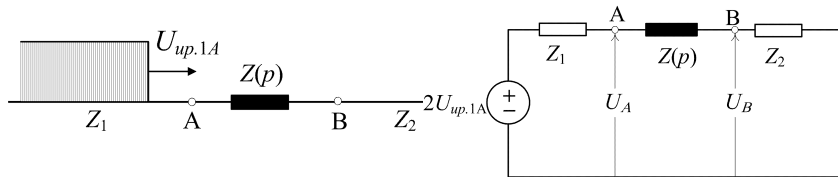
$$u_{od.1A}(t) = u_A(t) - U_m = U_m \cdot (1 - 2 \cdot e^{-t/T}) \cdot h(t)$$

Распределба на напонот при упад на бран по вод со кондензатор на крајот



- Кондензаторот ја намалува стрмнината на бранот (напонот постепено расте),
- Кога кондензаторот ќе се наполни тој претставува отворено коло, така што напонот ќе стане двојно поголем (при $t = 3T$),
- Без кондензаторот напонот моментално би скокнал на $2U_m$.

Калем редно врзан со два вода



$$U_A(p) = \frac{Z_2 + Z(p)}{Z_1 + Z_2 + Z(p)} \cdot \frac{2U_m}{p} = \frac{pL + Z_2}{pL + Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2U_m}{p}$$

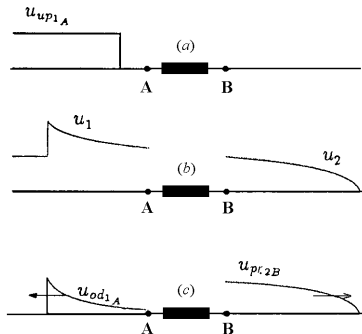
$$U_B(p) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z(p)} \cdot \frac{2U_m}{p} = \frac{Z_2}{pL + Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2U_m}{p}$$

$$u_A(t) = U_m \cdot \left(\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-t/T} \right) \cdot h(t) \quad T = \frac{L}{Z_1 + Z_2}$$

$$u_B(t) = U_m \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \left(1 - e^{-t/T} \right) \cdot h(t)$$

$$u_{od.1A}(t) = u_A(t) - U_m = U_m \cdot \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-t/T} \right) \cdot h(t)$$

Распределба на напонот при упад на бран по вод со редно врзан калем

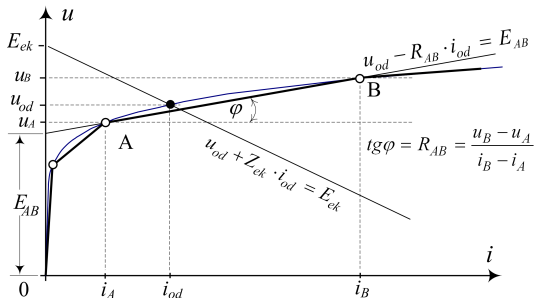


- a) упаден бран,
- b) напони на водовите 1 и 2,
- c) одбиени бранови.

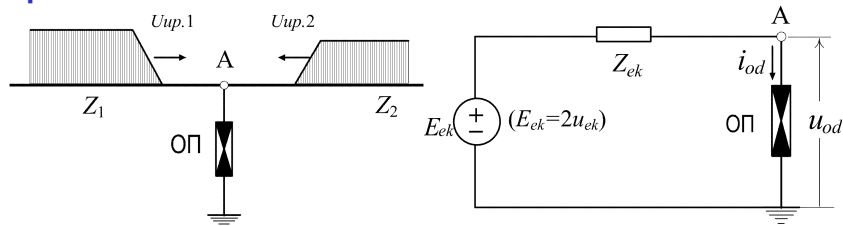
- Во моментот кога упадниот бран ќе наиде на калемот напонот u_A моментално се удвојува, а потоа постепено опаѓа до вредноста која би била без постоењето на калемот,
- Неопходно е преземање дополнителни мерки за заштита од пренапони на елементите со голема индуктивност кои имаат и заменарливо мала капацитивност.

Нелинеарен елемент

- Заштитата од пренапони се прави со примена на заштитни уреди наречени одводници на пренапони,
- Одводниците на пренапони се варистори (нелинеарни отпорници) со силно нелинеарна струјно напонска зависност $u(i) = k \cdot i^\alpha$,
- Во нумеричките пресметки $u(i)$ најчесто се апроксимира со искршена линија.



Упад на бран по вод на одводник на пренапони



$$u_{od} + Z_{ek} \cdot i_{od} = E_{ek}$$

$$u_{od} + Z_{ek} \cdot i_{od} = E_{ek}$$

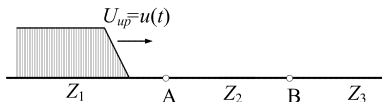
$$u_{od} = k \cdot i_{od}^{\alpha} \xrightarrow{\text{линеаризација}} u_{od} = E_{AB} + R_{AB} \cdot i_{od}$$

$$i_{od} = \frac{E_{ek} - E_{AB}}{R_{AB} + Z_{ek}}$$

$$u_{od} = E_{AB} + R_{AB} \cdot \frac{E_{ek} - E_{AB}}{R_{AB} + Z_{ek}}$$

Метод на мрежен дијаграм

- Воведен од Бјули (Bewley), бил применуван пред користењето на компјутерите,
- Овозможува прегледно и едноставно следење на движењето на брановите во сложените кола составени само од водови кај кои се јавуваат повеќекратни рефлексии,
- Денес тој има само едукативно значење и помага за полесно сфаќање на процесите на повеќекратните прекршувања и одбивања на бранови по водови.



$u(t) = a \cdot [t \cdot h(t) - (t - T_c) \cdot h(t - T_c)]$ ← упаден бран

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$\beta_{1A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

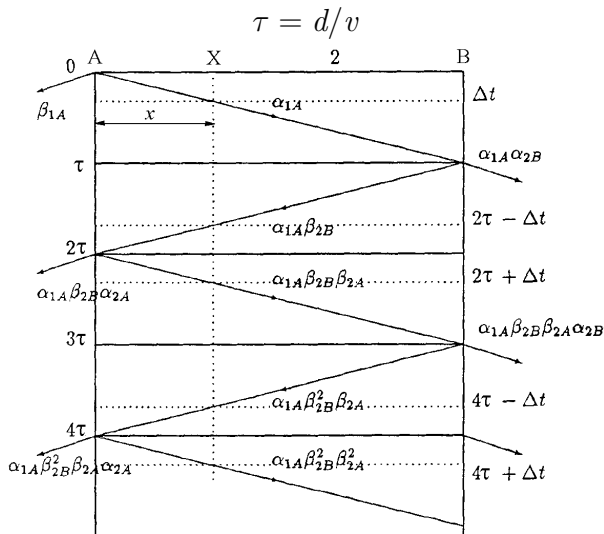
$$\alpha_{2A} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$\beta_{2A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$\alpha_{2B} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$\beta_{2B} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

Мрежен дијаграм за случајот на три редно врзани водови



Сумирање на прекршени и одбиени бранови (1)

$$\Delta t = x/v$$

$$\begin{aligned}u(x, t) &= \alpha_{1A} \cdot u(t - \Delta t) \cdot h(t - \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot u(t - 2\tau + \Delta t) \cdot h(t - 2\tau + \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} \cdot u(t - 2\tau - \Delta t) \cdot h(t - 2\tau - \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} \cdot u(t - 4\tau + \Delta t) \cdot h(t - 4\tau + \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A}^2 \cdot u(t - 4\tau - \Delta t) \cdot h(t - 4\tau - \Delta t) + \dots \\ u(x, t) &= \alpha_{1A} \cdot a \cdot (t - \Delta t) \cdot h(t - \Delta t) - \alpha_{1A} \cdot a \cdot (t - T_c - \Delta t) \cdot h(t - T_c - \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot a \cdot (t - 2\tau + \Delta t) \cdot h(t - 2\tau + \Delta t) - \\ &- \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot a \cdot (t - T_c - 2\tau + \Delta t) \cdot h(t - T_c - 2\tau + \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - 2\tau - \Delta t) \cdot h(t - 2\tau - \Delta t) - \\ &- \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - T_c - 2\tau - \Delta t) \cdot h(t - T_c - 2\tau - \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - 4\tau + \Delta t) \cdot h(t - 4\tau + \Delta t) - \\ &- \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} \cdot a \cdot (t - T_c - 4\tau + \Delta t) \cdot h(t - T_c - 4\tau + \Delta t) + \\ &+ \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A}^2 \cdot a \cdot (t - 4\tau - \Delta t) \cdot h(t - 4\tau - \Delta t) - \\ &- \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A}^2 \cdot a \cdot (t - T_c - 4\tau - \Delta t) \cdot h(t - T_c - 4\tau - \Delta t) + \dots\end{aligned}$$

Сумирање на прекршени и одбиени бранови (2)

Пример: $a = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $T_c = 1 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 4 \mu\text{s}$, $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$,
 $x = 300 \text{ m}$, $\Delta t = x/v = 1 \mu\text{s}$, $Z_1 = Z_3 = 400 \Omega$, $Z_2 = 50 \Omega$.

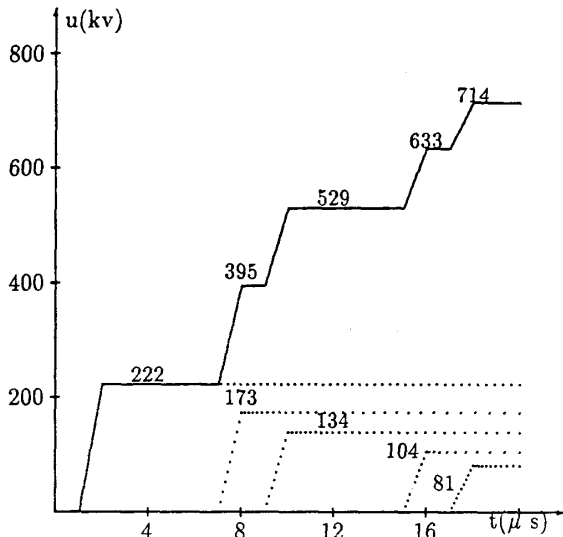
$\alpha_{1A} = 0,2222$; $\beta_{2B} = 0,7778$; $\beta_{2A} = 0,7778$.

$$\begin{aligned} u(x, t) = & 222 \cdot (t - 1) \cdot h(t - 1) - 222 \cdot h(t - 2) + \\ & + 173 \cdot (t - 7) \cdot h(t - 7) - 173 \cdot (t - 8) \cdot h(t - 8) - \\ & - 134 \cdot (t - 9) \cdot h(t - 9) - 134 \cdot (t - 10) \cdot h(t - 10) + \\ & + 104 \cdot (t - 15) \cdot h(t - 15) - 104 \cdot (t - 16) \cdot h(t - 16) - \\ & + 81 \cdot (t - 17) \cdot h(t - 17) - 81 \cdot (t - 18) \cdot h(t - 18) + \dots \end{aligned}$$

$$u(x, t) \rightarrow \frac{2Z_3}{Z_1 + Z_3} \cdot U_m$$

По голем број рефлексии напонот по должината на целиот вод 2 е константен, двата негови се однесуваат како да се една иста точка (водовите 1 и 3 се „споени“ директно).

Сумирање на прекршени и одбиени бранови (3)



Мрежен дијаграм за случајот со еден надземен вод и со два кабла

