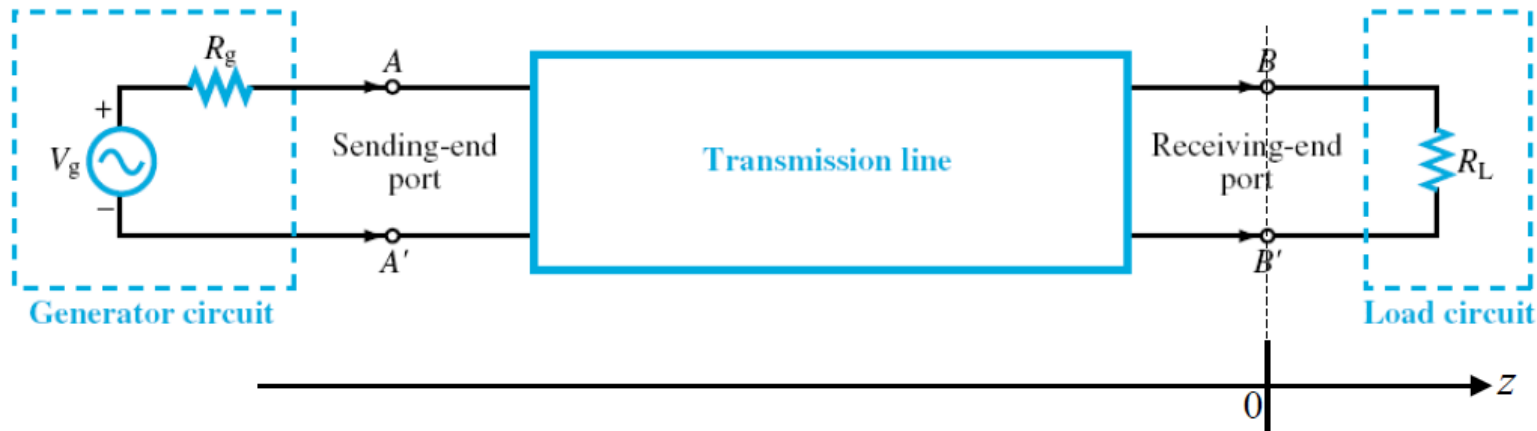


Sadržaj Predavanja

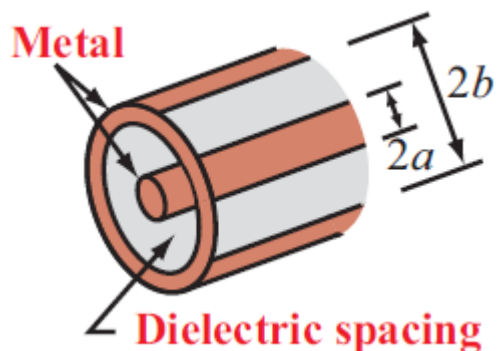
1. Prijenosne Linije
2. Distribuirani Parametri
3. Distribuirani Parameteri Koaksijalnog Kabela
4. Karakteristike Koaksijalnih kabela
5. TMR Uređaji za Detekciju Kvara na Kabelu

Prijenosne Linije

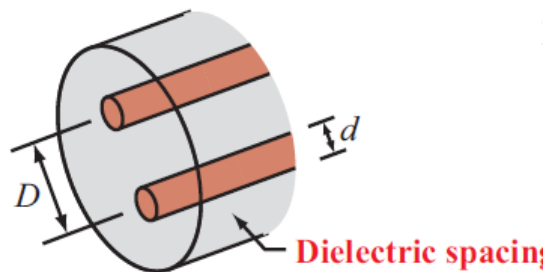


- Prijenosna linija je električna mreža sa jednim ulazom i jednim izlazom (dva terminala)
- Na ulazu se nalazi generator koji šalje signal prema izlazu
- Na kraju prijenosne linije se nalazi teret R_L
- Duljina prijenosne linije je jedan od najvažnijih parametara prijenosne linije
- Tipični primjer prijenosne linije je koaksijalni kabel ili valovod

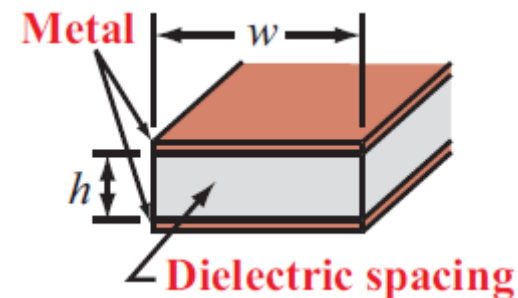
Prijenosne Linije - Vrste Prijenosnih Linija



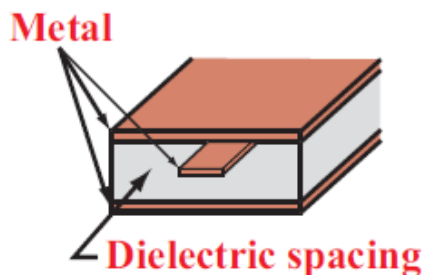
Koaksijalni kabel



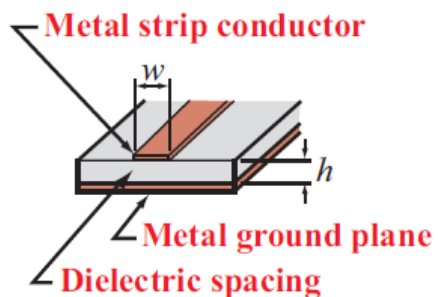
Dvožilni kabel



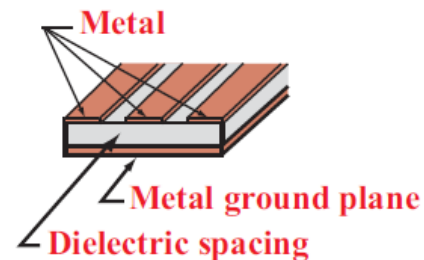
Linija sa paralelnim pločama



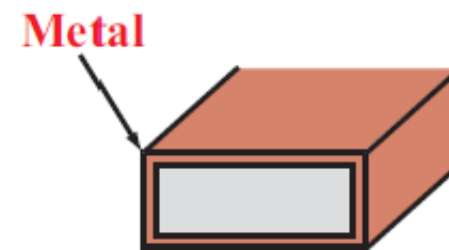
Strip line



Microstrip line

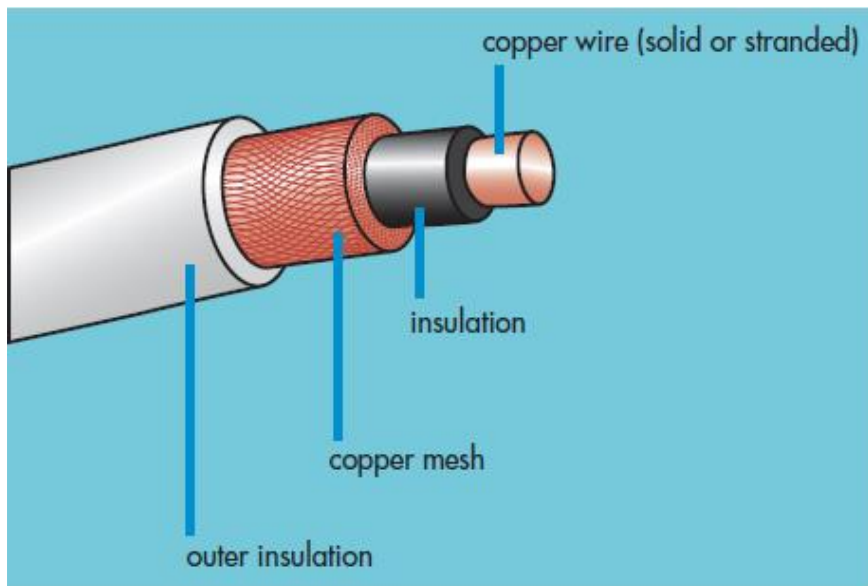


Koplanarni valovod



Valovod

Prijenosne Linije - Koaksijalni Kabel



Koaksijalni kabel

Na brodu se najčešće koristi koaksijalni kabel kao prijenosna linija.

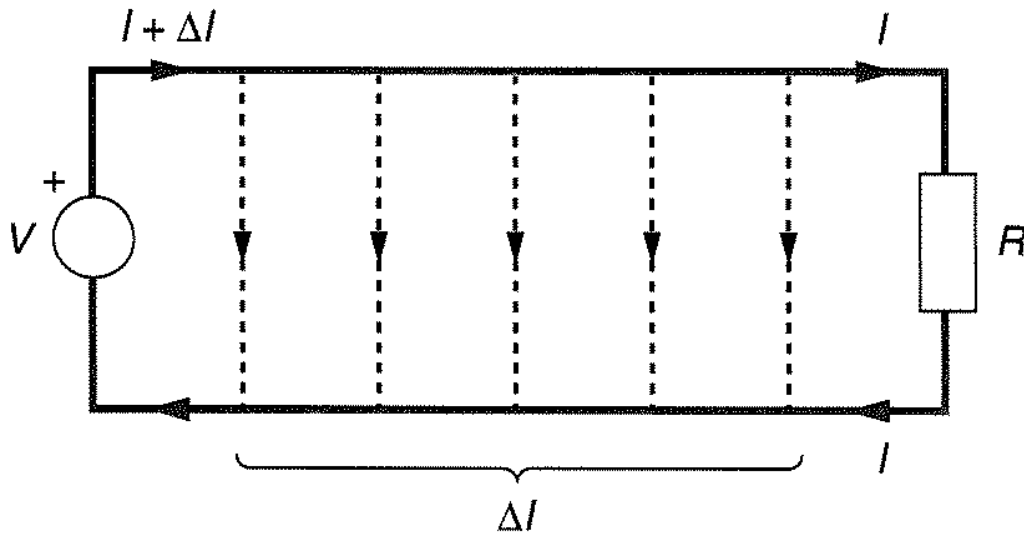
Tipično se sastoji od 4 sloja. U centru se nalazi bakrena žica oko koje se nalazi sloj izolacije.

Kao treći sloj koji okružuje vodič u centru imamo bakreni plašt koji služi da zaštiti centralni vodič od RFI (Radio Frequency Interference) te ujedno predstavlja i uzemljenje.

Posljednji sloj je opet izolacijski sloj koji služi da se kabel zaštiti od okoliša.

Namjena koaksijalnog kabela je prijenos video, radio ili data signala.

Prijenosne Linije



Shematski prikaz prijenosne linije sa idealnim vodičem i neidealnim izolatorom.

Kod prijenosnih linija pretpostavka je da dielektrični materijal između vodiča nije idealan.

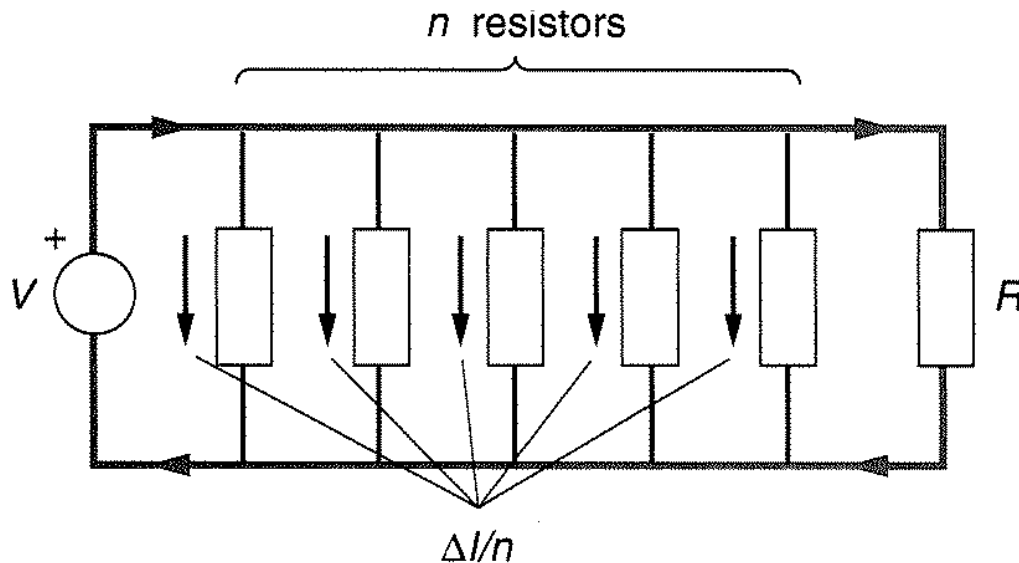
Struja I teče kroz vodič, ali nije ista u svakoj točki na vodiču.

Struja I ima najveći intezitet na generatoru i najmanji na teretu R

Razlog zbog kojeg opada intezitet stuje I su u prvoj aproksimaciji nesavršenosti izolacijskog materijala između vodiča.

Teorija prijenosnih linija se razlikuje od teorije sklopova i električnih mreža gdje se smatra da je struja jednako po cijelom vodiču koji spaja dvije točke.

Prijenosne Linije



Shematski prikaz prijenosne linije sa idealnim vodičem i neidealnim izolatorom koja se sastoji od n segmenata sa otporom između vodiča.

Treba primjetiti da ako uzmemo da je vodič idealan, a izolacija neidealna tada struje koje teku kroz izolaciju ne utječu na struju kroz teret.

Teorija električnih mreža se ipak može primjeniti na teoriju prijenosnih linija ako podijelimo prijenosnu liniju na n kratkih segmenata.

Svaki od ovih n segmenata sadrži određeni otpor koji spaja vodiče.

Ako $n \rightarrow \infty$ tada možemo govoriti o otporu po jedinici duljine prijenosne linije.

Prijenosne Linije

Ako prijenosnu liniju spojimo na generator izmjenične struje (AC) tada imamo induktivitet L po jedinici duljine kabela zbog samoinduktivnosti i drugih elektromagnetskih i fizikalnih efekata. Ovaj induktivitet je prisutan bez obzira da li promatramo vodič kao idealan ili neidealno.

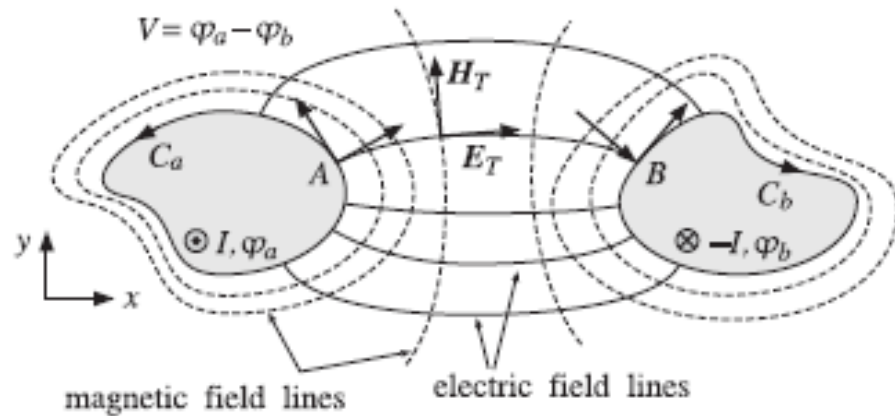
Također imamo i kapacitivnost C po jedinici duljine zbog toga što imamo izolator između dvije metalne ploče.

Ako uzmemo da vodiči nisu idealni tada imamo i n otpora vezanih u seriju, tj. serijski otpor po jedinici duljine.

Analiza prijenosne linije u AC uvjetima zahtjeva da podijelimo prijenosnu liniju na konačan broj R-L-C krugova spojenih u seriju.

Ovi parametri (R,L,C) prijenosne linije nazivaju se još i *distribuirani parametri*.

Prijenosne Linije



Prijenosna linija sa dva vodiča

Problematiku prijenosnih linija možemo pojednostavniti na dvodimenzionalni elektrostatski problem:

$$(1) \vec{H}_T = \frac{1}{\eta} \vec{e}_z \times \vec{E}_T$$

$$(2) \nabla_T \times \vec{E}_T = 0$$

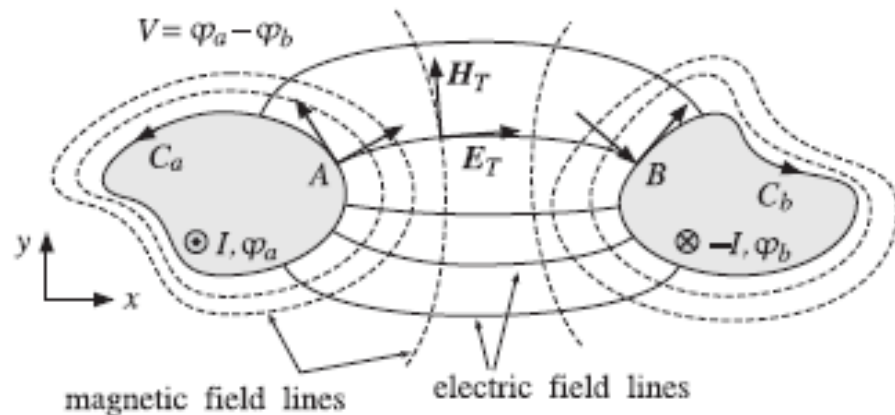
$$(3) \nabla_T \cdot \vec{E}_T = 0$$

Budući da je $\nabla_T \times \vec{E}_T = 0$ tada je električno polje:

$$(4) \vec{E}_T = -\nabla_T \varphi$$

Gdje je φ elektrostatski potencijal.

Prijenosne Linije



Prijenosna linija sa dva vodiča

Kombinirajući jednađbe (3) i (4) dobije se:

$$(5) \nabla_T \cdot \vec{E}_T = -\nabla_T \cdot \nabla_T \varphi = \nabla_T^2 \varphi = 0$$

Jednađba (5) naziva se još i Laplaceova jednađba.

Vodiči se u elektrostatskoj aproksimaciji smatraju ekvipotencijalima elektrostatskog rješenja Laplaceove jednađbe.

Silnice električnog polja počinju sa vodičem pozitivnog naboja i završavaju na vodiču negativnog naboja.

Silnice magnetskog polja su okomite na silnice električnog polja (vidi jednađbu 1)

Prijenosne Linije

Kod prijenosnih linija uzimamo da se elektromagnetska polja propagiraju duž z osi frekvencijom ω te sa valnim brojem $\beta = \omega/c$. Stoga možemo pisati za struju i napon:

$$(6) V(z, t) = V e^{j\omega t - j\beta z}$$

$$(7) I(z, t) = I e^{j\omega t - j\beta z}$$

Iz jednađžbi (6) i (7) se vidi da je omjer struje i napona konstantan i iznosi:

$$(8) Z = \frac{V}{I}$$

Za prijenosne linije bez gubitaka induktivitet i kapacitet po jedinici duljine je jednak:

$$(9) L' = \mu \frac{Z}{\eta}$$

$$(10) C' = \epsilon \frac{\eta}{Z}$$

Prijenosne Linije

Gubici kod prijenosnih linija nastaju zbog omskog zagrijavanja dielektrika između kabela te zbog omskog zagrijavanja samog vodiča (ako nije idealan). Zbog toga dolazi do atenuacije ili gušenja signala:

$$(11) \alpha_c = \frac{R'}{2Z}$$

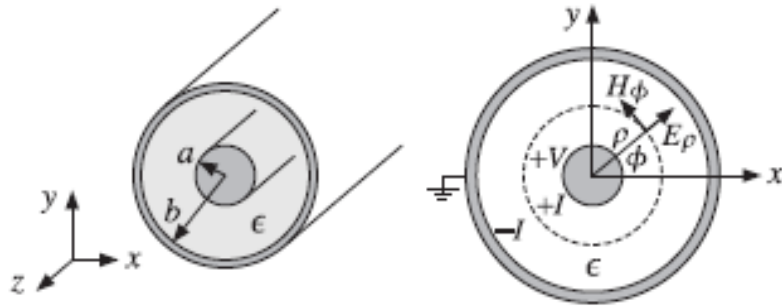
$$(12) \alpha_d = \frac{1}{2} G' Z$$

Gdje je R' omski otpor prijenosne linije po jedinici duljine a G' je vodljivost dielektrika po jedinici duljine. Vodljivost dielektrika po jedinici duljine se može dovesti u vezu sa kapacitetom po jedinici duljine:

$$(13) G' = \frac{\sigma_d}{\epsilon} C'$$

U jednadžbi (13) σ_d je vodljivost dielektrika između vodiča.

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

Prijenos AC signala kroz koaksijalni kabel se može pod određenim uvjetima (niska frekvencija) promatrati kao elektrostatski problem:

$$(14) \vec{E} = -\nabla\varphi$$

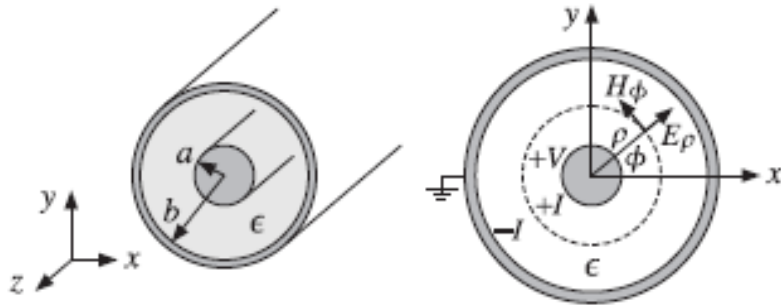
gdje je φ elektrostatski potencijal. U elektrostatskom slučaju elektrostatski potencijal φ zadovoljava Laplaceovu jednadžbu:

$$(15) \nabla^2\varphi = 0$$

Operator ∇^2 se naziva Laplaceov operator i u Kartezijevim koordinatama se piše kao:

$$(16) \nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}$$

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

U cilindričnom koordinatnom sustavu Laplaceov operator glasi:

$$(17) \nabla^2 \varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$$

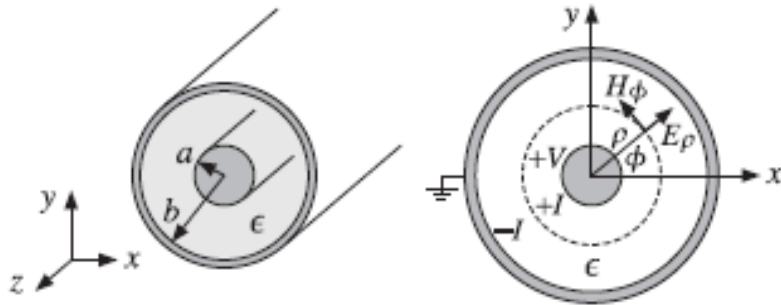
Ako uzmemo da je kabel vrlo dug, onda zbog simetrije φ ne ovisi o z . Tada imamo:

$$(18) \nabla^2 \varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2}$$

Također zbog simetrije φ ne ovisi niti o kutu ϕ :

$$(19) \nabla^2 \varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right)$$

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

Dakle da nađemo potencijal φ koaksijalnog kabela treba riješiti Laplaceovu jednađbu:

$$(20) \nabla^2 \varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) = 0$$

Jednađbu (7) pomnožimo sa ρ te integrirajući dobijemo:

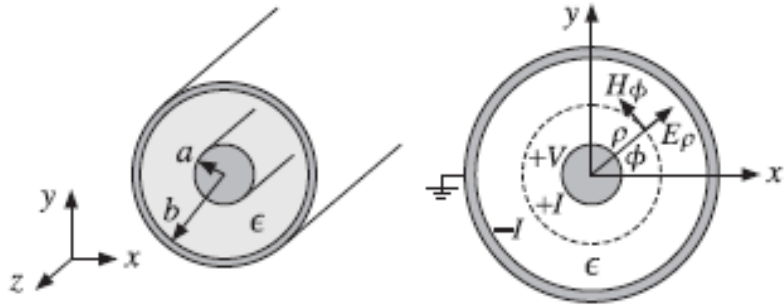
$$(21) \rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = B$$

gdje je B proizvoljna konstanta. Ako (21) podijelimo sa ρ i onda integriramo dobijemo da:

$$(22) \varphi(\rho) = B \ln \rho + A$$

gdje je A proizvoljna konstanta.

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

Konstante A i B se mogu odrediti iz rubnih uvjeta. Iz slike se vidi da je unutarnji dio vodiča na potencijalu V a vanjski na potencijalu 0. Dakle možemo pisati dvije jednačbe:

$$(23) \varphi(a) = B \ln a + A = V$$

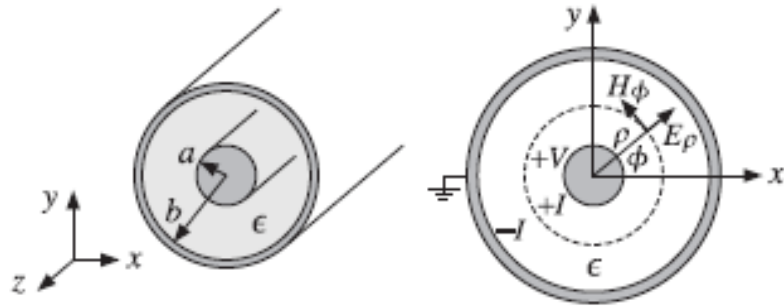
$$(24) \varphi(b) = B \ln b + A = 0$$

Iz jednačbi (23) i (24) odrede se konstante A i B kao:

$$(25) B = \frac{V}{\ln \frac{a}{b}}$$

$$(26) A = -B \ln b = -\frac{V}{\ln \frac{a}{b}} \ln b$$

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

Uvrštavanjem A i B u izraz (22) dobije se:

$$(27) \varphi(\rho) = \frac{V}{\ln \frac{a}{b}} \ln \rho - \frac{V}{\ln \frac{a}{b}} \ln b = V \frac{\ln \frac{\rho}{b}}{\ln \frac{a}{b}}$$

Električno polje je jednako gradijentu potencijala:

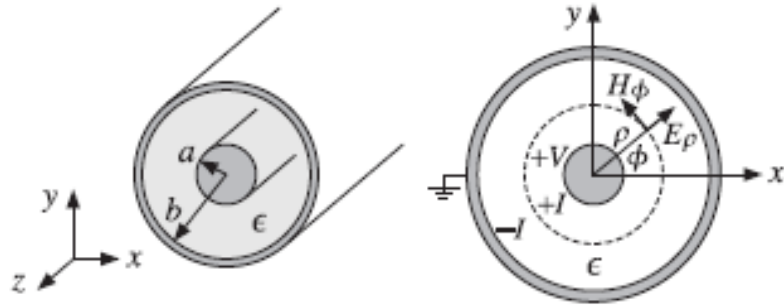
$$(28) \vec{E} = -\nabla\varphi = -\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} \vec{e}_\rho = -\frac{1}{\rho} \frac{V}{\ln \frac{a}{b}} \vec{e}_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{V}{\ln \frac{b}{a}} \vec{e}_\rho$$

te je usmjereno radijalno iz centra koaksijalnog kabela. Transverzalno magnetsko polje se može naći pomoću izraza:

$$(29) \vec{H}_T = \frac{1}{\eta} \vec{e}_z \times \vec{E}$$

gdje je $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ karakteristična impedancija medija između vodiča.

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

Kombinirajući izraze (28) i (29) dobije se izraz za transverzalno magnetsko polje:

$$(30) \vec{H}_T = \frac{1}{\eta \rho} \frac{V}{\ln \frac{b}{a}} \vec{e}_\phi$$

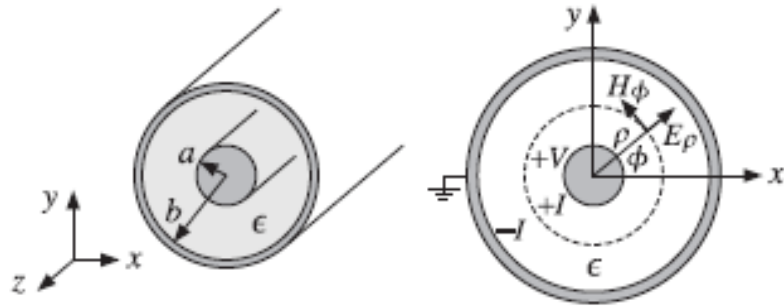
Struja se može naći iz (4)-te Maxwellove jednačbe:

$$(31) \oint \vec{H}_T \cdot d\vec{l} = \sum I + \frac{\partial}{\partial t} \iint \vec{D} \cdot d\vec{S}$$

Budući da $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, \vec{D} se ne mijenja u vremenu te imamo:

$$(32) \oint \vec{H}_T \cdot d\vec{l} = \sum I$$

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

Integrirajući magnetsko polje po cirkularnoj petlji oko vodiča možemo dobiti struju:

$$(33) I = \oint \vec{H}_T \cdot d\vec{l} = \oint_0^{2\pi} \frac{1}{\eta \rho} \frac{V}{\ln \frac{b}{a}} \vec{e}_\phi \cdot \rho \vec{e}_\phi d\phi = \frac{2\pi}{\eta} \frac{V}{\ln \frac{b}{a}}$$

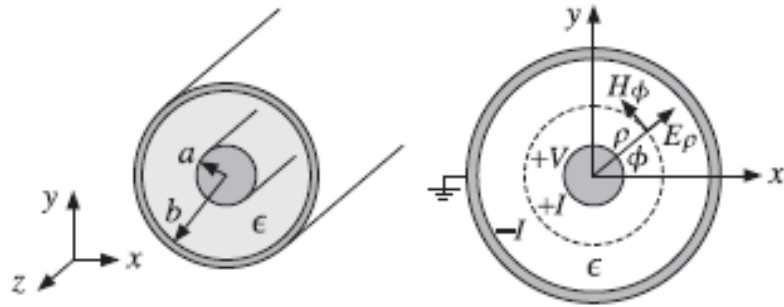
Karakteristična impedancija je $Z = V/I$ te se može naći iz relacije (33):

$$(34) Z = \frac{\eta}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

Iz jednadžbi (9) i (10) mogu se naći iznosi induktivnosti i kapacitivnosti po metru duljine kabela:

$$(35) L' = \mu \frac{Z}{\eta} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

Distribuirani Parametri Koaksijalnih Kabela



Koaksijalni kabel

$$(36) C' = \epsilon \frac{\eta}{Z} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\frac{b}{a}}$$

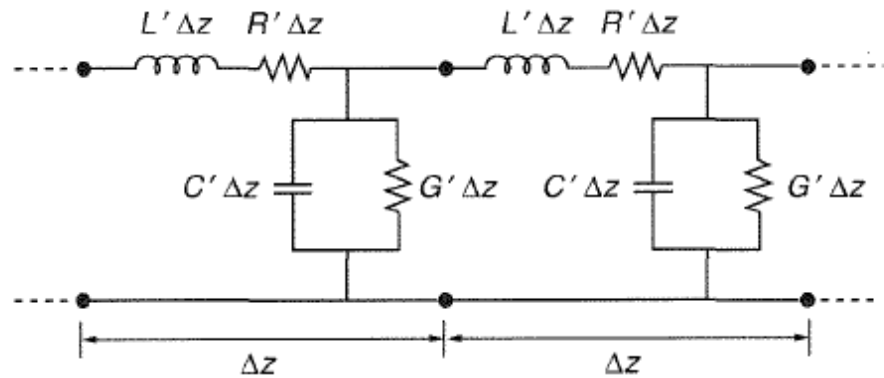
Električni otpor po jedinici duljine koaksijalnog kabela se može naći iz izraza:

$$(37) R' = \frac{R_S}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$$

Otpor R_S se odredi prema izrazu:

$$(38) R_S = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma_c}}$$

Prijenosne Linije



Na svakom odsječku kabela distribuirani induktivitet L' po jedinici duljine je u seriji sa otporom R' po jedinici duljine.

Vodljivost dielektrika G' po jedinici duljine se nalazi u paralelnom spoju sa kapacitetom C' po jedinici duljine.

Prijenosne Linije

Signal na prijenosnoj liniji sastoji se od reflektiranog i transmitiranog signala:

$$(39) I(z) = \frac{V_+}{Z_0} e^{j\omega t} e^{-j\beta z} - \frac{V_-}{Z_0} e^{j\omega t} e^{+j\beta z}$$

U fazorskoj notaciji jednačba (39) postaje:

$$(40) I(z) = \frac{V_+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_-}{Z_0} e^{+j\beta z}$$

Karakteristična impedancija Z_0 je jednaka omjeru induktiviteta i kapaciteta po jedinici duljine:

$$(41) Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Za koaksijalni kabel bez omskih gubitaka karakteristična impedancija Z_0 je jednaka:

$$(42) Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{b}{a}$$

Prijenosne Linije

Za komercijalne kabele, karakteristična impedancija se kreće u rasponu od 50Ω - 90Ω .

Koeficijent refleksije Γ se definira kao omjer:

$$(42) \Gamma(z) = \frac{V_-(z)}{V_+(z)}$$

S druge strane impedancija vala na mjestu z može se pisati kao:

$$(43) Z(z) = \frac{V(z)}{I(z)} = Z_0 \frac{V_+(z)+V_-(z)}{V_+(z)-V_-(z)} = Z_0 \frac{1+\Gamma(z)}{1-\Gamma(z)}$$

Iz (43) slijedi da je:

$$(45) \Gamma(z) = \frac{Z(z)-Z_0}{Z(z)+Z_0}$$

Prijenosne Linije

Ako uzmemo da je koordinata z na teretu $z = 0$ sada možemo naći koeficijente refleksije i transmisije kada je $Z_L = 0$ (kratki spoj), $Z_L = \infty$ (otvoreni krug) te kada je $Z_L = Z_0$ (kada je koaksijalni kabel zaključen svojom zaključnom impedancijom)

$$(46) \Gamma_{(Z_L=0)} = \frac{0-Z_0}{0+Z_0} = -1$$

$$(47) \Gamma_{(Z_L=\infty)} = \frac{Z(z)-Z_0}{Z(z)+Z_0} = \frac{1-\frac{Z_0}{Z(z)}}{1+\frac{Z_0}{Z(z)}} = 1$$

$$(48) \Gamma_{(Z_L=Z_0)} = 0$$

Dakle ako je koaksijalni kabel zaključen svojom zaključnom impedancijom onda je energija upadnog vala kompletno absorbirana na teretu.

Koaksijalni Kabeli

- Najčešće vrijednosti impedancije koaksijalnih kabela su 50Ω i 75Ω
- Koaksijalni kabeli od 50Ω se koriste za prijenos radio signala i data signala (Ethernet)
- Koaksijalni kabeli od 75Ω se koriste za prijenos audio, video i nekih telekomunikacijskih signala.
- Koaksijalni kabeli imaju atenuaciju koja se definira kao gubitak signala po jedinici duljine kabela i izražava se u decibelima (dB). Potrebno je paziti da atenuacija ne prelazi zadane parametre
- Atenuacija koaksijalnog kabela je funkcija frekvencije signala
- Brzina propagacije (VOP) u koaksijalnom kabelu je jednaka brzini svjetlosti u kabelu. Sa starenjem kabela mijenja se i impedancija kabela te se mijenja i (VOP)

Koaksijalni Kabeli

Kod izbora koaksijalnog kabela treba voditi računa o karakteristikama koaksijalnog kabela. Oznaka R označava kabel koji je za radio frekvencije. Oznaka G znači government. Broj označava approval number a slovo U se odnosi na univerzalnu specifikaciju.

Specification	RG-58/U	RG-59/U	RG-8X	RG-8/U	RG-213
Nominal O.D.	$\frac{3}{16}$ "	$\frac{1}{4}$ "	$\frac{1}{4}$ "	$\frac{13}{32}$ "	$\frac{13}{32}$ "
Conductor AWG	#20	#23	#16	#13	#13
Impedance, ohms	50	75	50	52	50
Attenuation/100', dB					
@50 MHz	3.3	2.4	2.5	1.3	1.3
@110 MHz	4.9	3.4	3.7	1.9	1.9
@1,000 MHz	21.5	12.0	13.5	8.0	8.0

Reprinted with permission from *Boatowner's Electrical Handbook*, second edition, by Charlie Wing

Koaksijalni Kabeli

Koaksijalne kabele treba birati i prema atenuaciji. U tabeli se nalaze maksimalne vrijednosti atenuacije koaksijalnog kabela s obzirom na vrstu uređaja po NMEA standardu.

**TABLE
16-2**

Maximum Allowable Signal Loss by Equipment Type (per NMEA)

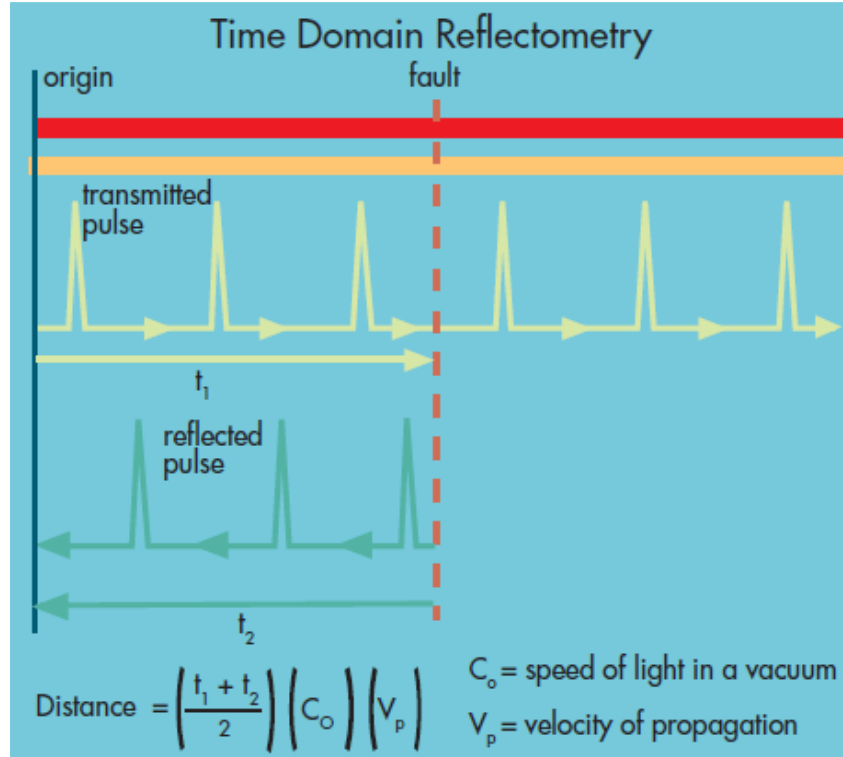
Equipment	Maximum Loss (dB)	Operating Frequency
VHF radio	3	162 MHz
SSB radio	3	2–22 MHz
Cell phone	3	850 MHz or 1.9 GHz
Television	6	54–806 MHz
Satellite TV	6	1.6 GHz
GPS	3	1.5 GHz
DGPS	3	150–500 kHz

Source: NMEA

NMEA - National
Marine Electronics
Association

TDR (Time Domain Reflectometer)

TDR je uređaj koji emitira električne impulse i može detektirati lokaciju greške (prekida) na kabele.



Da bi TDR funkcionirao kao parametar mora poznavati brzinu propagacije unutar kabela (VOP).

VOP se izražava kao postotak brzine svjetlosti u vakuumu,
 $C_0 \approx 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$

VOP vrijednost je uvijek manja od 100% za sve vrste kabela.

Današnji TDR uređaji uglavnom dolaze sa bibliotekom VOP vrijednosti za pojedine vrste kabela te omogućuju i mjerenje VOP vrijednosti kabela. Najčešće VOP vrijednosti su u opsegu od (60% - 65%).

TDR (Time Domain Reflectometer)

TDR uređaj dolazi i sa određenim limitima. Svjetlosna žarulja sastoji se od vodiča i žarne niti koja ima drukčiji VOP od ostatka vodiča. U tom slučaju dolazi do neželjene refleksije signala i TDR će pogrešno očitati kvar. Slično se događa i kada signal TDR-a prolazi kroz osigurače.

