



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
TRANSPORTA INSTITŪTS**



**V. POPOVS, A.VASIĻJEVS**

**MATEMĀTISKIE MODEĻI UN  
ALGORITMI  
KABEĻU SAKARU LĪNIJU  
PROJEKTĒŠANĀ.**

**RĪGA 2015**

**UDK 621.25 (075.8) : 681.3.07**

**Popovs V., Vasiljevs A. MATEMĀTISKIE MODEĻI UN ALGORITMI  
KABEĻU SAKARU LĪNIJU PROJEKTĒŠANĀ. Rīga: RTU, 2015, 100 lpp.**

Darbā ir aprakstīta elektromagnētisko viļņu izplatīšanās kabeļu sakaru līnijās, simetrisko, koaksiālo un šķiedru optisko līniju parametru aprēķināšana, izmantojot inženiermetodes, kā arī apskatīti sakaru līniju automatizētās projektēšanas pamati.

Sakaru līniju pamatparametri ir detalizēti izskatīti, formulas ir apkopotas un piedāvātas sistematizētā veidā SI mērvienību sistēmā. Doti aprēķinu skaitliskie piemēri Mathcad programmā, parādītas parametru frekvenču dispersijas raksturlīknes. Materiāls sniedz teorētiskās zināšanas, kas nepieciešamas kabeļu sakaru līniju parametru izpratnei.

Darbā izstrādātie algoritmi un programmas paredzētas gan speciālistiem sakaru tīklu projektēšanas jomā, gan studentiem, kuri apgūst specializāciju dzelzceļa automātikas, telemehānikas un sakaru sistēmās, vai arī iegūst profesiju telekomunikāciju nozarē.

Recenzents: Dr.sc.ing. V.Mirtovs, RTU DzTI

Iespiests saskaņā ar RTU Transporta institūta 2015. gada .8.janvārī , Padomes lēmumu, protokols Nr.1.

**ISBN 978-9984-32-013-7**

**© Popovs V., Vasiljevs A., 2015**

## SATURS

Ievads .....	4
1. Virzošās sistēmas .....	55
1.1. Virzošo sistēmu klasifikācija .....	5
1.2. Virzošo sistēmu aprēķināšanas metodes .....	5
1.3. Elektromagnētiskie viļņi virzošajās sistēmās.....	6
2. Simetrisko kabeļu sakaru līniju matemātiskie modeļi un algoritmi.....	8
2.1. Ievads .....	8
2.2. SKSL primārie parametri.....	9
2.3. SKSL sekundārie parametri .....	15
2.4. SKSL pārraides darba parametri .....	16
2.5. Secinājumi.....	18
3. Koaksiālo kabeļu sakaru līniju matemātiskie modeļi un algoritmi.....	20
3.1. Ievads .....	20
3.2. KKSL primārie parametri .....	21
3.3. KKSL sekundārie parametri .....	24
3.4. Secinājumi.....	25
4. Šķiedru optikas sakaru līniju matemātiskie modeļi un algoritmi.....	27
4.1. Ievads .....	27
4.2. ŠOSL parametri .....	28
4.3. ŠOSL reģenerācijas iecirkņa garuma aprēķins .....	36
4.4. Secinājumi.....	37
5. Kabeļu sakaru līniju parametru aprēķins un analīze .....	39
5.1. Mūsdienīgu sakaru kabeļu konstrukcijas materiāli.....	39
5.2. Kabeļu sakaru līniju parametru inženieraprēķini .....	41
5.2.1. SKSL inženieraprēķinu un standarta parametru salīdzināšana .....	43
5.2.2. KKSL inženieraprēķinu un standarta parametru salīdzināšana .....	47
5.2.3. ŠOSL inženieraprēķinu un standarta parametru salīdzināšana .....	48
6. Mūsdienu heterogēna telekomunikāciju tīkla modelēšana un eksperimentālā izpēte .....	50
6.1. Uzdevuma nostādne .....	50
6.2. Heterogēnā tīkla modelēšana un optimizācija .....	50
6.3. Heterogēnā tīkla darbības princips.....	52
6.4. Heterogēnā tīkla monitoringa un mērījumu metodes.....	53
Secinājumi.....	58
Literatūra.....	60
Pielikumi .....	62

## IEVADS

Kabeļu sakaru līnijas līdz šai dienai plaši izmanto kā analogu un ciparu signālu pārraides kanālus telekomunikāciju tīklos. Kabeļu līniju izmantošana inženierpraksē prasa skaidru priekšstatu par sakaru līniju parametru aprēķinu metodēm, to matemātiskās modelēšanas iespējām. Liela uzmanība jāpievērš parametru izmaiņām dažādu faktoru ietekmē, it īpaši mainoties signāla darba frekvencei.

Mūsdienu programmatūra ļauj realizēt līnijas parametru matemātisko modelēšanu, tai skaitā arī automatizētā režīmā, un noteikt aprēķināto lielumu precizitāti, salīdzinot modeļus ar reāliem kabeļiem, kurus izmanto industrijā.

Bakalaura darba mērķis ir realizēt simetrisko, koaksiālo un šķiedru optikas sakaru līniju pamatparametru inženieraprēķinu metodes, izstrādāt automatizētā aprēķina algoritmus un veikt saņemto parametru vērtību analīzi. Uzstādītā mērķa sasniegšanairisinātišādi uzdevumi:

- simetrisko kabeļu līniju matemātisko modeļu izpēte, analīze un koriģēšana;
- koaksiālo kabeļu līniju modeļu izpēte, analīze un koriģēšana;
- optiskās šķiedras kabeļu līniju modeļu izpēte, analīze un koriģēšana;
- materiālu izvēles kritēriju noteikšana kabeļu ražošanā;
- simetrisko un koaksiālo kabeļu līnijuparametru frekvenču dispersijas cēloņu analīze;
- vienmodu optisko šķiedru līniju hromatiskās dispersijas cēloņu analīze;
- automatizētā aprēķina algoritma izstrāde;
- mūsdienu telekomunikāciju tehnoloģiju un tīklu izpēte.

Darba pirmajā nodaļā ir dota virzošās sistēmas definīcija; otrajā, trešajā un ceturtajā nodaļā ir aprakstītas simetriskās, koaksiālās un optisko šķiedru sakaru līnijas, apkopotas un sistematizētas kabeļu līniju parametru aprēķināšanas formulas. Darba piektajā nodaļā ir veiktakabeļu parametru analīze, aprēķināto un standarta parametru salīdzināšana, bet sestā nodaļa ir pilnībā veltīta mūsdienu heteroģenā telekomunikāciju tīkla modelēšanai un tajā izmantoto tehnoloģiju pielietošanai praksē.

Pielikumos ir doti darbā izmantoto kabeļu datu lapas, simetrisko, koaksiālo un šķiedru optisko kabeļu līniju parametru aprēķinu piemēri uzdevumiem, kas tiek risināti mācību procesa gaitā "Dzelzeļa transporta sakaru un informācijas sistēmas" virzienā Rīgas Tehniskās universitātes Transporta institūtā.

## **1. VIRZOŠĀS SISTĒMAS**

### **1.1. Virzošo sistēmu klasifikācija**

Ierīces, kas ir paredzētas elektromagnētiskas enerģijas pārraidei dotajā virzienā, sauc par virzošām sistēmām. Vairumā gadījumu vadītāju vai dielektriķu virsma ir tas, kas veido virzošās sistēmas. Līdz ar to elektromagnētiskie viļņi pārvietojas gar tām robežu virsmām, kas darbojas kā sava veida "sliedes".

Telekomunikācijā un radiosakaros izmanto dažāda tipa virzošās sistēmas: divvadu līnijas (gaisvadu, kabeļu), sloksnes līnijas, koaksiālas līnijas, metāliskus vai dielektriskus viļņvadus, optiskās līnijas.

Atšķir homogenas un heterogēnas, regulāras un neregulāras, izotropas un anizotropas virzošās sistēmas. Ja vides parametri, kurā izplatās vilnis, ir homogēni, tad virzošā sistēma arī ir homogēna; ja vides parametri ir heterogēni, tad virzošo sistēmu sauc par heterogēno.

Lineāras homogenas bezgalīgi garas virzošās sistēmas sauc par regulārām.

Reālos gadījumos virzošās sistēmas ir heterogēnas, jo parametri izplatīšanas virzienā var ievērojami svārstīties. Sakaru sistēmās virzošās ierīces var izmantot pie dažādiem nosacījumiem un dažādos frekvenču diapazonos.

Visplašāk virzošās sistēmas lieto kā sakaru līnijas, pārraidot signālus lielos attālumos, un kā fīderus, kas ir paredzēti elektromagnētiskas enerģijas pārraidei: caur raidītājiem uz antenām un no antenām uz uztvērējiem.

### **1.2. Virzošo sistēmu aprēķināšanas metodes**

Atkarībā no izmantotā frekvenču diapazona un virzošas sistēmas konstrukcijas, caur kuru izplatās elektromagnētiskie viļņi, izmanto kādu no divām aprēķinu metodēm:

- izmantojot ķēžu teorijas vienādojumus (pielietojot garo līniju vienādojumus (telegrāfa vienādojumus)), kur mainīgu vietā — strāvas un spriegumi, nevis  $\mathbf{E}$  un  $\mathbf{H}$  vektori;
- izmantojot elektrodinamikas lauku vienādojumus (Maksvela vienādojumus), kas ļauj saņemt viļņu vienādojumus un noteikt trīs galvenos vektorus: elektriskā lauka intensitāti  $\mathbf{E}$ , magnētiskā lauka intensitāti  $\mathbf{H}$  un elektromagnētiskā lauka enerģijas plūsmas blīvuma vektoru (Pointinga vektoru)  $\mathbf{\Pi}$ .

Pirmā metode parasti tiek izmantota simetrisko, koaksiālo un sloksnes līniju parametru inženieru aprēķinos.

Otrā metode ir vispārīgāka un smagāka. To izmanto elektromagnētisko viļņu (EMV) izplatīšanas modelēšanai koaksiālajos, viļņvada un optiskajās līnijās, turklāt tiek pieņemts, ka elektromagnētiskie viļņi jau ir ierosināti un elektromagnētisko lauku avotus (EML) nesatur.

### 1.3. Elektromagnētiskie viļņivirzošajās sistēmās

Virzošajās sistēmās vispārējā gadījumā var izplatīties elektromagnētiskie viļņi ar dažādām īpašībām. Šīs īpašības galvenokārt ir atkarīgas no elektromagnētisko viļņu tipa, kuru noteic elektromagnētiskā lauka gareniskās komponentes esamība [9]:

- elektromagnētiskais šķērsvilnis (Transverse Electromagnetic Wave, **TEM**) — vilnim nav elektromagnētiskā lauka gareniskās komponentes, t.i.,  $\mathbf{E}_z$  un  $\mathbf{H}_z$  ir vienādi ar nulli un Pointinga vektors  $\mathbf{\Pi} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \mathbf{\Pi}_z$  ir vērsts  $z$  koordinātes virzienā, kas liecina par jaudas pārraidi caur sistēmu;
- magnētiskais šķērsvilnis (Transversal Magnetic Wave, **TM = E**) —  $\mathbf{H}_z = 0$ ,  $\mathbf{E}_z \neq 0$ ;
- elektriskais šķērsvilnis (Transversal Electric Wave, **TE = H**) —  $\mathbf{E}_z = 0$ ,  $\mathbf{H}_z \neq 0$ ;
- augstākā tipa viļņi — hibrīdu **EH<sub>mn</sub>** un **HE<sub>mn</sub>**viļņi, kurām elektromagnētiskā lauka komponentes nav vienādas ar nulli.

Jāatzīmē, ka elektromagnētiskā lauka spēka līniju sadalījums TEM tipa viļņiem ir līdzīgs EMV spēka līniju sadalījumam, taču  $\mathbf{E}$  un  $\mathbf{H}$  nav vienādi pēc lieluma un virziena. Elektromagnētiskais lauks līnijā ir saistīts ar vadītspējas strāvu vadītājos (kas mainās gar garenisko koordināti  $z$ ), bet  $\mathbf{E}_z = 0$ ,  $\mathbf{H}_z = 0$ . Tas attiecās uz pirmās grupas virzošām sistēmām ar TEM viļņiem (simetriskās un koaksiālās līnijas).

Otrās grupas virzošās sistēmas pārraidei izmanto  $\mathbf{TM} = \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{TE} = \mathbf{H}$  un hibrīdu viļņus  $\mathbf{EH}$ ,  $\mathbf{HE}$ . Praksē:

- simetriskajās un koaksiālajās virzošajās sistēmās galvenokārt izmanto  $\mathbf{TEM}$  elektromagnētiskus viļņus;
- metāliskajos taisnleņķa viļņvados izmanto  $\mathbf{TE}_{10} = \mathbf{H}_{10}$  viļņus;
- metāliskajos cilindra viļņvados izmanto  $\mathbf{TE}_{11}$  un  $\mathbf{TE}_{01}$ ;
- optiskajās virzošajās sistēmas par EMV galveno tipu kalpo hibrīda vilnis  $\mathbf{HE}_{11}$  (vienmodu režīmam), taču izmanto arī  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{EH}$ ,  $\mathbf{HE}$  tipa viļņus.

Elektromagnētiskus viļņus sadala ne tikai klasēs, bet arī pēc tipa. Viļņa tips jeb moda tiek noteikta pēc elektromagnētiskā lauka struktūras sarežģītības virzošās sistēmas šķērsriezumā. Visu elektromagnētisko viļņu daudzveidību var aprakstīt ar  $\mathbf{H}_{mn}$ ,  $\mathbf{HE}_{mn}$  viļņiem, kur  $m$  ir cilindriskās virzošās sistēmas lauka pilno izmaiņu skaits pēccilindra riņķa līnijas (perimetra), bet  $n$  — pēc diametra. Indeksi ir naturālie skaitļi:  $m = \{0, 1, 2, \dots\}$ ,  $n = \{1, 2, 3, \dots\}$ .

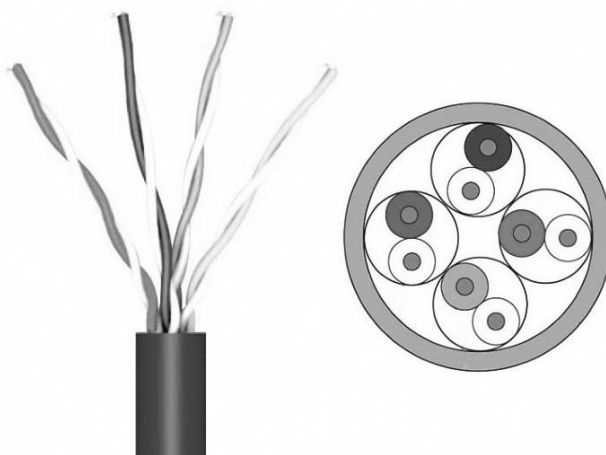
Visus taisnleņķa un cilindriskas virzošās sistēmas raksturo t.s. kritiskā frekvence (robežfrekvence) un kritiskais viļņa garums. Šie parametri noteic robežas, kurās ir iespējama elektromagnētisko viļņu izplatīšanās: ja darba frekvence ir mazāka par kritisko, vai viļņa garums ir lielāks par kritisko, tad elektromagnētiskie viļņi virzošajā sistēmā neizplatās un signāla pārraide nenotiek.

## 2. SIMETRISKO KABEĻU SAKARU LĪNIJUMATEMĀTISKIE MODEĻI UN ALGORITMI

### 2.1. Ievads

Simetriskais kabelis — sakaru kabelis, kas sastāv no diviem vai vairākiem savītiem vai paralēliem vadiem (2.1. att). Vadi ir savstarpēji izolēti.

Simetrisko kabeļu sakaru līnija (SKSL) ir elektriska ķēde ar izkļiedētiem parametriem. Šādu ķēžu īpatnība ir līnija no diviem vadītājiem ar vienādām konstruktīvām īpašībām. Pieliekot spriegumu divvadu līnijai, vados plūst noteiktās frekvences elektriskā strāva. Strāva un spriegums ierosina apkārt vadiem mainīgo elektromagnētisko lauku.



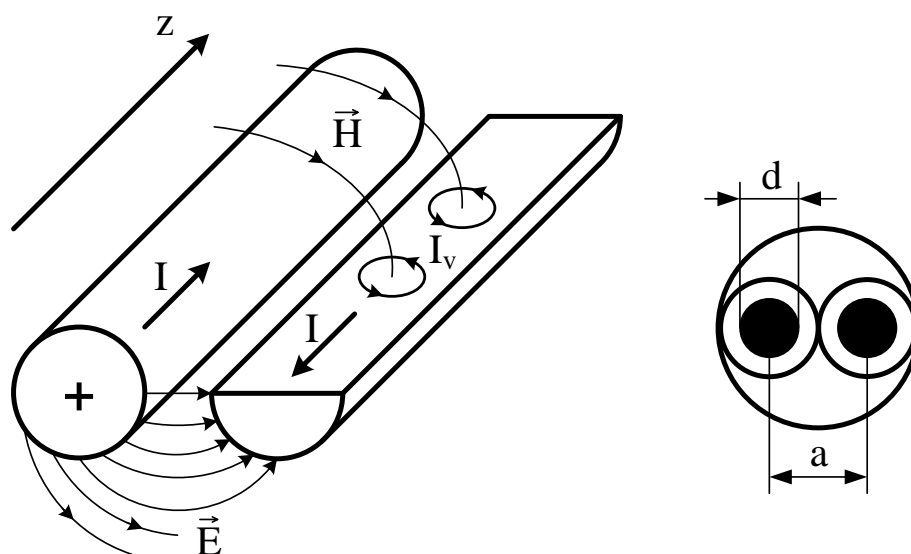
2.1. att. Simetriska kabeļa konstrukcija

Vispārējā gadījumā divvadu līnijas elektromagnētiskais lauks ir daudzviļņu lauks (2.2. att.) [5]. Līnijā var izplatīties **TEM**, **E** un **H** tipa viļņi. Galvenais ir **TEM** tipa šķērsvilnis. Reālajā gadījumā elektromagnētiskajam viļnim (EMV) izplatoties klāt ir elektromagnētiskā lauka gareniskās komponentes  $\mathbf{E}_z \neq 0$ ,  $\mathbf{H}_z \neq 0$ .

Vadītājā plūstošai strāvai palielinoties, vadītāja gareniskā šķēluma plaknē rodas virpuļstrāvas  $I_v$ , kuras vada ass tuvumā ir vērstas strāvai pretējā virzienā. Strāvas blīvums ass tuvumā samazinās, bet virsmas tuvumā palielinās, un augstfrekvences strāvas plūst tikai plānā slānītī virsmas tuvumā (skinslānī). Šo parādību sauc par skinefektu. Skinefekta dēļ

augstfrekvences strāvu tehnikā blīvu vadu vietā izmanto caurules vai dielektriķu vadus, kuru virsma pārklāta ar plānu vadītāja materiāla kārtiņu.

Strāvas blīvumu vadītājā ietekmē arī kaimiņvados plūstošās strāvas. Blakusesošā vada ārējais lauks rada virpuļstrāvas, kas neļauj strāvai plūst vienmērīgi, tādēļ palielinot aktīvo pretestību. Šo parādību sauc par tuvuma efektu. Tuvuma efekts ir tieši proporcionāls frekvencei, magnētiskai caurlaidībai un ir atkarīgs no vadītāju diametra un līnijas kopējā garuma.



**2.2. att. Viļņu izplatīšanās simetriskajā kabelī**

Divvadu līnijas elektromagnētiskā lauka detalizētā analīze ir pietiekami komplicēta, jo nācās saskarties ar koordinātu sistēmas izvēli un sarežģīto viļņu vienādojumu risināšanu. Parasti divvadu līnijas pētījumu veic, izmantojot tuvinātās metodes.

SKSL matemātisko modeļu izveidei tiek izmantotas tuvinātās metodes, kuras ļauj iegūt pusempīriskās izteiksmes primāro un sekundāro parametru aprakstīšanai.

## 2.2. SKSL primārie parametri

Simetrisko kabeļu sakaru līnijas primārie parametri ir aktīvā pretestība  $R$ , vadītspēja  $G$ , induktivitāte  $L$  un kapacitāte  $C$ . Parametri ir vienmērīgi izkļiedēti visas līnijas garumā [4].

Līnijas aktīvā pretestība noteic enerģijas zudumus vados un kabeļa metāliskajos elementos. Aktīvā garuma pretestība līdzstrāvai (2.2) tiek izteikta no homogēna metāliska vadītāja pretestības vispārējās formulas:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \Omega \quad (2.1)$$

kur  $\rho$  — vadītāja materiāla īpatnēja pretestība (2.3. tabula),  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;

$l$  — vadītāja garums, mm;

$S$  — vadītāja dzīslas šķēluma laukums,  $\text{mm}^2$ .

$$R_0 = \frac{2550 \cdot \rho \cdot \chi}{d^2}, \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (2.2)$$

kur  $d$  — vadītāja diametrs, mm;

$\chi$  — kabeļa savijuma koeficients, kuru aprēķina pēc formulas (2.3).

$$\chi = \sqrt{1 + \pi^2 \left( \frac{d + d_1}{h} \right)^2}, \quad (2.3)$$

kur  $d_1$  — izolētas dzīslas diametrs, kuru aprēķina pēc formulas (2.4), mm;

$h$  — savijuma solis, mm.

$$d_1 = d + 2\delta + 2\Delta, \text{ mm} \quad (2.4)$$

kur  $\delta$  — vada izolācijas biezums, mm;

$\Delta$  — vada joslizolācija, mm.

## 2.1. tabula

**Kabeļa parametru formulas atkarībā no vadu savijuma tipa**

Savijuma tips	Attālums starp vadītājiem, mm	Grupas diametrs, mm	Labojuma koeficients
Pāra	$a = d_1$	$D_p = 1.71d_1$	$\psi_p = \frac{(D_p + d_1 - d)^2 - a^2}{(D_p + d_1 - d)^2 + a^2}$
Dubultpāra	$a = d_1$	$D_{dp} = 2.72d_1$	$\psi_{dp} = \frac{(0.65 \cdot D_{dp} + d_1 - d)^2 - a^2}{(0.65 \cdot D_{dp} + d_1 - d)^2 + a^2}$
Zvaigžņu	$a = 1.41d_1$	$D_z = 2.41d_1$	$\psi_z = \frac{(D_z + d_1 - d)^2 - a^2}{(D_z + d_1 - d)^2 + a^2}$
Dubultzvaigžņu	$a = 1.41d_1$	$D_{dz} = 3.98d_1$	$\psi_{pz} = \frac{(0.43 \cdot D_{dz} + d_1 - d)^2 - a^2}{(0.43 \cdot D_{dz} + d_1 - d)^2 + a^2}$

Līnijas kopējo garuma pretestību, ņemot vērā augstfrekvenču signālu ietekmi, aprēķina šādi:

$$R = R_0 \left[ 1 + F(x) + \frac{P_s \cdot G(x) \cdot (d/a)^2}{1 - H(x) \cdot (d/a)^2} \right] + \Delta R, \frac{\Omega}{km} \quad (2.5)$$

kur  $x$  — cilindrisko funkciju arguments no 2.2. tabulas;

$F(x), G(x), H(x)$  — cilindrisko funkciju vērtības pēc 2.4. tabulas datiem;

$P_s$  — koeficients, kas raksturo zudumus kaimiņvadu tuvuma efekta dēļ (2.5. tabula);

$a$  — attālums starp vadītājiem, mm;

$\Delta R$  — papildzudumi metāla apvalkā,  $\Omega/km$ .

## 2.2. tabula

### Cilindrisko funkciju argumenta formulas

Vadītāja materiāls	Koeficients $x$
Varš	$0.0106 d \sqrt{f}$
Alumīnijs	$0.0085 d \sqrt{f}$
Cits	$0.0005 d \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}$

kur  $f$  — signāla darba frekvence, Hz;

$\mu$  — absolūtā magnētiskā caurlaidība (2.6), H/m;

$\sigma$  — materiāla elektrovadītspēja no 2.3. tabulas, S/m.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \frac{H}{m} \quad (2.6)$$

kur  $\mu_0$  — magnētiskā konstante,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m;

$\mu_r$  — relatīvā magnētiskā caurlaidība,  $\mu_r = 1$ .

## 2.3. tabula

### Materiālu īpatnējās pretestības un elektrovadītspējas vērtības

Materiāls	Īpatnējā pretestība $\rho$ , ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	Elektrovadītspēja $\sigma \cdot 10^6$ , S/m
Sudrabs	0.016	62.5
Varš	0.0175	58
Zelts	0.022	45.5
Alumīnijs	0.0292	37

Tērauds	0.137	7.69
---------	-------	------

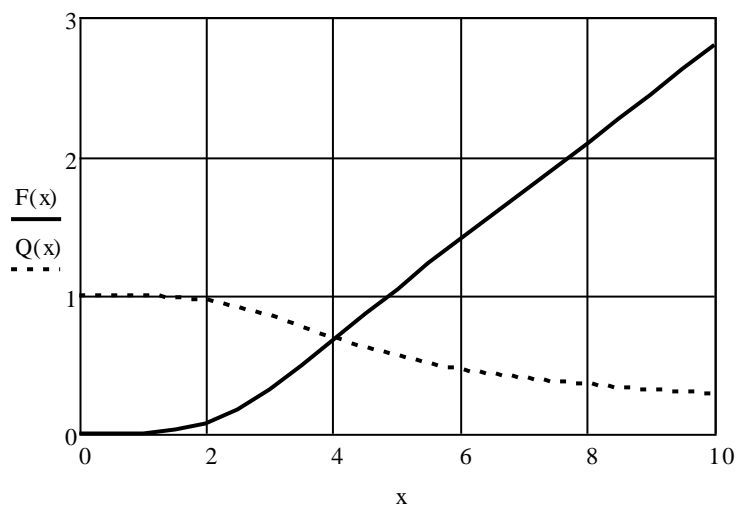
Sakaru līniju parametru aprēķinos plaši izmanto cilindriskās funkcijas, kas satur diferenciālvienādojumu risinājumus un ļauj aprēķināt pretestības palielināšanos vai samazināšanos dažādu efektu dēļ. Funkciju un argumentu vērtības dotas 2.4. tabulā.

2.4. tabula

Cilindrisko funkciju un argumentu vērtības

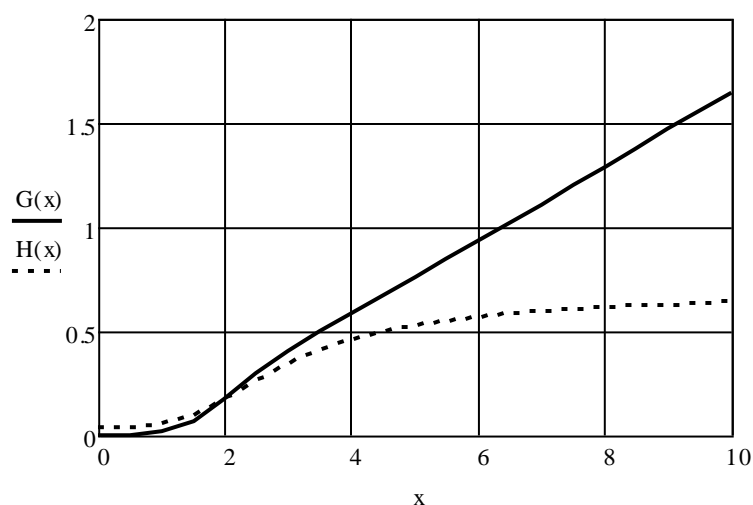
x	F(x)	G(x)	H(x)	Q(x)
0.0	0	0	0.0417	1
0.5	0.000326	0.000975	0.042	0.9998
1.0	0.00519	0.01519	0.053	0.997
1.5	0.0258	0.0691	0.092	0.987
2.0	0.0782	0.1724	0.169	0.961
2.5	0.1756	0.295	0.263	0.913
3.0	0.318	0.405	0.348	0.845
3.5	0.492	0.499	0.416	0.766
4.0	0.678	0.584	0.466	0.686
4.5	0.862	0.669	0.503	0.616
5.0	1.042	0.755	0.530	0.556
7.0	1.743	1.109	0.596	0.400
10	2.799	1.641	0.643	0.286
>10	$\frac{\sqrt{2x}-3}{4}$	$\frac{\sqrt{2x}-1}{8}$	0.750	$\frac{2\sqrt{2}}{x}$

Funkcijas visērtāk attēlot grafiski, nezināmās vērtības var noteikt ar interpolācijas palīdzību. Funkcija F(x) raksturo pretestības palielināšanos, bet Q(x) — pretestības pazemināšanos(2.3. att.) virsmas efekta dēļ.



2.3. att. Virsmas efekta raksturojošās funkcijas

G(x) un H(x) funkcijas(2.4. att.) apraksta tuvuma efekta ietekmi.



2.4. att. Tuvuma efekta raksturojošās funkcijas

2.5. tabula

Zudumu koeficienta vērtības

Savijuma tips	Zudumu koeficients $P_s$
Pāra	1
Dubultpāra	2
Zvaigžņu	5
Dubultzvaigžņu	3

Garuma induktivitāti var aprēķināt no izteiksmes:

$$L = \chi \cdot \left[ 4 \cdot \ln\left(\frac{2a-d}{d}\right) + Q(x) \cdot \mu_r \right] \cdot 10^{-4}, \frac{H}{km} \quad (2.7)$$

kur  $Q(x)$  — cilindriskas funkcijas vērtība no 2.4. tabulas.

Simetriskā kabeļa garuma kapacitāte nav atkarīga no frekvences un tiek aprēķināta pēc formulas:

$$C = \frac{\chi \cdot \varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln\left(\frac{2a-d}{d} \psi\right)}, \frac{F}{km} \quad (2.8)$$

kur  $\varepsilon_r$  — izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība (2.6. tabula),

$\psi$  — labojuma koeficients, kas ir atkarīgs no kabeļa savijuma tipa (2.1. tabula)

## 2.6. tabula

### Izolācijas materiālu raksturlielumu vērtības

Izolācijas materiāls	Izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība $\epsilon_r$	Izolācijas zuduma leņķa tangenss $\operatorname{tg}\delta \cdot (10^{-4})$
Polipropilēns (PP)	2.2–2.4	2–5
Polivinilhlorīds (PVC)	3.2–4.0	150–250
Polivinilacetāts (PVA)	3.1	25
Ppolistirols (PS)	2.4–2.8	2–9
Polietilēns ar mazu blīvumu (LDPE)	2.2–2.3	2–3
Polietilēns ar lielu blīvumu (HDPE)	2.3–2.4	2–8
Fiziski uzputots porains polietilēns (PEEG)	1.35–1.46	0.9–1.18
Ķīmiski uzputots porains polietilēns (PPE)	1.65	3–8.5
Fluorplasts-4 (PTFE)	2.02	2
Stirofleksa kords	1.2–1.3	1–6
Papīra kords	1.3–1.4	55–280
Papīra masa	1.6–1.7	25–28
Papīrs un gaiss	1.5–1.6	—
Gaiss	1.00055	—

Sakaru līnijas garuma vadītspēja atspoguļo enerģijas zudumus kabeļa izolācijā:

$$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta(f), \frac{S}{km} \quad (2.9)$$

kur  $\operatorname{tg}\delta(f)$ — izolācijas zuduma leņķa tangenss, atkarīgs no darba frekvences  $f$  (2.6. tabula).

## 2.3. SKSL sekundārie parametri

Sakaru līnijas sekundārus parametrus parasti aprēķina pēc vispārējām formulām. Simetriskās līnijas viļņu pretestību izteic kā sakni no garuma induktivitātes un kapacitātes attiecības:

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}}, \Omega \quad (2.10)$$

Taču viļņu pretestību var atrast arī neņemot vērā zudumus izolācijā:

$$Z_v = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{2a-d}{d}\right), \Omega \quad (2.11)$$

Garuma rimšanas koeficients:

$$\alpha = 8.69 \cdot \left( \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{dB}{km} \quad (2.12)$$

Fāzes koeficients:

$$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{rad}{km} \quad (2.13)$$

Signāla izplatīšanās ātrums:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{km}{s} \quad (2.14)$$

Saīsinājuma koeficients parāda, cik reizēs signāla izplatīšanās ātrums ir mazāks, salīdzinot to ar gaismas ātrumu vakuumā:

$$K_s = \frac{c}{v}, \quad (2.15)$$

kur  $c$  — gaismas ātrums vakuumā,  $3 \cdot 10^5$  km/s.

Kabeļa saīsinājuma koeficients ir atkarīgs no dielektriķa īpašībām. Novecošanas procesā vadu izolācijas dielektriskā caurlaidība un zuduma leņķa tangenss palielinās, līdz ar ko samazinās signāla izplatīšanās ātrums un pieaug garuma rimšanas koeficients.

Signāla izplatīšanās laiks:

$$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, s \quad (2.16)$$

kur  $L_g$  — sakaru līnijas garums, km.

## 2.4. SKSL pārraides darba parametri

Simetriskās kabeļu sakaru līnijas viļņu parametri — viļņu pretestība un darba rimšanas koeficients. Tos aprēķina, ņemot vērā signāla pārraides nosacījumus līnijā. Ja līnija ir saslēgta uz saskaņoto slodzi un tajā nav atstarotu viļņu, maksimālas jaudas pārraidei līnijā ieejas pretestībai  $Z_{ie}$  jābūt vienādei ar izejas pretestību  $Z_{iz}$ .

$$Z_{ie} = Z_v \cdot \frac{1 + \eta_l \cdot e^{-2\gamma l}}{1 - \eta_l \cdot e^{-2\gamma l}}, \Omega \quad (2.17)$$

kur  $\gamma$  — elektromagnētisko viļņu izplatīšanas koeficients (2.18);

$l$  — līnijas garums;

$\eta_l$  — atstarošanas koeficients līnijas beigās (2.19).

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} = \alpha + j\beta, \quad (2.18)$$

kur  $\omega$  — cikliskā frekvence (2.19), rad/s;

$\alpha$  — garuma rimšanas koeficients, Np/km;

$\beta$  — fāzes koeficients, rad/km.

$$\omega = 2\pi f, \frac{rad}{s} \quad (2.19)$$

$$\eta_l = \frac{Z_g - Z_v}{Z_s - Z_v}, \quad (2.20)$$

$$\eta_0 = \frac{Z_g - Z_v}{Z_g + Z_v}, \quad (2.21)$$

kur  $\eta_0$  — atstarošanas koeficients līnijas sākumā.

$Z_g$  — ģenerators pretestība,  $\Omega$ ;

$Z_s$  — slodzes pretestība,  $\Omega$ .

Līnijas darba rimšana tiek aprēķināta kā zudumu summa:

$$a_d = \alpha \cdot L + \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3, dB \quad (2.22)$$

kur  $\alpha$  — garuma rimšanas koeficients (2.11), dB/km;

$L$  — līnijas garums, km;

$\Delta a_1$  — zudumi, kas rodas ģenerators un viļņu pretestības nesaskaņošanas dēļ (2.23), dB;

$\Delta a_2$  — zudumi, kas rodas līnijas un slodzes nesaskaņošanas dēļ (2.24), dB;

$\Delta a_3$  — atstarošanas mijiedarbības zudumi (2.25), dB;

$$\Delta a_1 = 8.69 \cdot \ln \left| \frac{Z_g + Z_v}{2\sqrt{Z_g Z_v}} \right|, dB \quad (2.23)$$

$$\Delta a_2 = 8.69 \cdot \ln \left| \frac{Z_s + Z_v}{2\sqrt{Z_s Z_v}} \right|, \text{ dB} \quad (2.24)$$

$$\Delta a_3 = 8.69 \cdot \ln |1 - e^{-2\gamma} \eta_0 \eta_l|, \text{ dB} \quad (2.25)$$

## 2.5. Secinājumi

1. Apskatīti pusempīriskie matemātiskie modeļi, kas ļauj noteikt simetrisko kabeļu līniju primārus, sekundārus parametrus un to funkcionālo atkarību no darba frekvences.
2. Simetrisko kabeļu sakaru līniju parametru formulas ir apkopotas 2.7. tabulā.
3. Aprēķinos tiek pieņemts, ka simetriska kabeļa garuma kapacitāte un viļņa pretestība nav atkarīgas no frekvences, bet garuma pretestība, vadītspēja, rimšanas koeficients palielinās, palielinoties signāla frekvencei.
4. Saīsinājuma koeficients ir atkarīgs no elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma un attiecīgi no signāla frekvences. Ārējo faktoru ietekmē kabeļa izolācijas īpašības izmainās ar laiku, kas ietekmē saīsinājuma koeficienta vērtību.
5. Maksimālo simetriskās līnijas darba garumu noteic pie 30 dB liela rimšanas koeficienta.

## 2.7. tabula

### SKSL parametru aprēķināšanas algoritms

N.p.k.	Parametrs	Formula	Mērvienības
1.	Garuma pretestība	$R = R_0 \left[ 1 + F(x) + \frac{P_s \cdot G(x) \cdot (d/a)^2}{1 - H(x) \cdot (d/a)^2} \right], \frac{\Omega}{km}$	R <sub>0</sub> , Ω/km d, mm a, mm
2.	Garuma induktivitāte	$L = \chi \cdot \left[ 4 \cdot \ln \left( \frac{2a-d}{d} \right) + Q(x) \cdot \mu_r \right] \cdot 10^{-4}, \frac{H}{km}$	d, mm a, mm
3.	Garuma kapacitāte	$C = \frac{\chi \cdot \varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left( \frac{2a-d}{d} \psi \right)}, \frac{F}{km}$	d, mm a, mm
4.	Garuma vadītspēja	$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \frac{S}{km}$	f, Hz C, F/km
5.	Viļņu pretestība	$Z_v = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \ln \left( \frac{2a-d}{d} \right), \Omega$	d, mm a, mm
6.	Garuma rimšanas koeficients	$\alpha = 8.69 \cdot \left( \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{dB}{km}$	R, Ω/km L, H/km C, F/km G, S/km
7.	Fāzes koeficients	$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{rad}{km}$	f, Hz L, H/km C, F/km
8.	Signāla izplatīšanās ātrums	$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{km}{s}$	L, H/km C, F/km
9.	Signāla izplatīšanās laiks	$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, s$	L <sub>g</sub> , km v, km/s
10.	Saīsinājuma koeficients	$K_s = \frac{c}{v}$	c, km/s v, km/s
11.	Līnijas darba rimšana	$a_d = \alpha \cdot L + \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3, dB$	α, dB/km Δa <sub>1</sub> , dB Δa <sub>2</sub> , dB Δa <sub>3</sub> , dB

### 3. KOAKSIĀLO KABEĻU SAKARU LĪNIJU MATEMĀTISKIE MODEĻI UN ALGORITMI

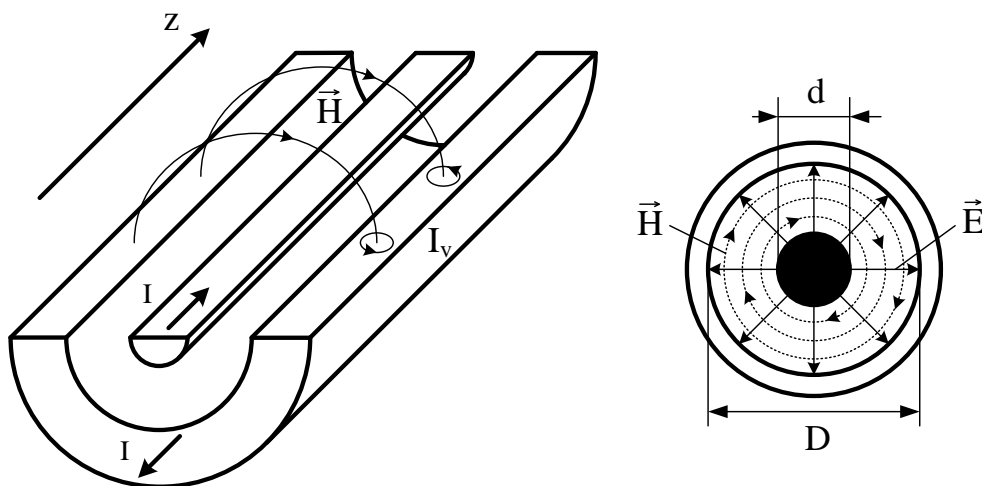
#### 3.1. Ievads

Koaksiālo kabeļu sakaru līniju (KKSL) veido divi metāliski vadītāji: viens caurules formā (ekrāns), otrs ievietots caurulē (3.1. att.). Starp ekrānu un centrālo vadu atrodas izolējošs materiāls.



3.1. att. Koaksiāla kabeļa konstrukcija

Koaksiālo kabeļu sakaru līnija ir noslēgtā tipa virzošā sistēma. Koaksiālus kabeļus pārsvarā izmanto frekvencēm sākot ar 50 kHz. Augstfrekvenču signāls rada spēcīgu tuvuma efektu un skinefektu, kad darba strāva plūst tikai plānā slānītī iekšējā vadītāja ārējā pusē un ekrāna iekšējā pusē (3.2. att.) [5].



3.2. att. Viļņu izplatīšanās koaksiālajā kabeļī

Līnijā var izplatīties elektromagnētiskie **TEM**, magnētiskie **E**, elektriskie **H** un jauktie šķērsviļņi. Elektromagnētiskais lauks ir koncentrēts koaksiāla kabeļa iekšienē un aiz ārējās izolācijas robežām ir vienāds ar nulli. Tādā veidā koaksiālo kabeļu sakaru līniju parametrus var aprakstīt, izmantojot tuvinātus matemātiskus modeļus un neņemot vērā blakusķēžu ietekmi.

### 3.2. KKSL primārie parametri

Koaksiālas līnijas galvenie raksturlielumi, tāpat kā simetrisko kabeļu sakaru līnijai, ir četri pārraides parametri: aktīvā pretestība, vadītspēja, induktivitāte un kapacitāte [4]. Tie attēlo kabeļa materiālu fizikālo īpašību ietekmi uz signāla pārraides kvalitāti.

Aktīvo pretestību  $R$  un induktivitāti  $L$  var izteikt no vadītāja pilnās iekšējās pretestības:

$$Z = R + j\omega L, \Omega \quad (3.1)$$

kapacitāti  $C$  un vadītspēju  $G$  — no pilnās vadītspējas formulas:

$$Y = G + j\omega C, S \quad (3.2)$$

kur  $\omega$  — cikliskā frekvence (3.18), rad/s.

Aktīvā pretestība nosaka elektriskās enerģijas zudumus līnijā. Koaksiāla kabeļa kopējā pretestība ir iekšējā  $R_a$  un ārējā  $R_b$  vadītāja summa:

$$R = R_a + R_b, \Omega \quad (3.3)$$

Iekšējā vadītāja pretestību, ņemot vērā kabeļa konstrukciju, aprēķina kā dzīslas pretestību. Iekšējās vadītāja pretestību vispārējā gadījumā izsaka, izmantojot cilindriskās funkcijas:

$$R_a = R_0 \cdot [1 + F(x)], \frac{\Omega}{km} \quad (3.4)$$

kur  $R_0$  — aktīvā garuma pretestība līdzstrāvai (3.2),  $\Omega/\text{km}$ ;

$F(x)$  — cilindriskā funkcija, kas raksturo pretestības palielināšanos virsmas efekta dēļ;

$x$  — cilindriskas funkcijas arguments(3.2. tabula).

Praksē koaksiāla kabeļa izmantošana ir efektīvāka augstfrekvenču signālu pārraidei. Tādā gadījumā garuma pretestības aprēķināšanai lieto vienkāršoto formulu:

$$R_a = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi \cdot \sigma_a}} \cdot \frac{1}{d} \cdot 10^6, \frac{\Omega}{km} \quad (3.5)$$

kur  $f$  — signāla darba frekvence, Hz;

$d$  — iekšējā vadītāja diametrs, mm;

$\mu$  — absolūtā magnētiskā caurlaidība(3.6), H/m;

$\sigma_a$  — materiāla, no kura izgatavots iekšējais vadītājs, elektriskā vadītspēja, S/m.

Arējā vadītāja pretestību augstās frekvencēs aprēķina pēc analogiskas formulas:

$$R_b = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi \cdot \sigma_b}} \cdot \frac{1}{D} \cdot 10^6, \frac{\Omega}{km} \quad (3.6)$$

kur  $D$  — kabeļa ekrāna iekšējais diametrs, mm;

$\sigma_b$  — materiāla, no kura izgatavots ekrāns, elektriskā vadītspēja, S/m.

Saskaitot kopā abu vadītāju pretestības (3.3), tiek iegūta koaksiāla kabeļa pilnās garuma pretestības formula:

$$R = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi}} \cdot \left( \frac{1}{\sigma_a \cdot d} + \frac{1}{\sigma_b \cdot D} \right) \cdot 10^6, \frac{\Omega}{km} \quad (3.7)$$

Pieņemot relatīvās magnētiskās caurlaidības lielumu  $\mu_r = 1$ , pretestības noteikšanai var izmantot vienkāršoto izteiksmi. Koaksiāla kabeļa garuma pretestība, ja vadītāji ir izgatavoti no vara:

$$R = 4.18 \cdot \sqrt{f} \cdot \left( \frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) \cdot 10^{-2}, \frac{\Omega}{km} \quad (3.8)$$

ja abi vadītāji ir no alumīnija:

$$R = 5.2 \cdot \sqrt{f} \cdot \left( \frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) \cdot 10^{-2}, \frac{\Omega}{km} \quad (3.9)$$

Koaksiāla kabeļa garuma induktivitāte sevī iekļauj ne tikai vadītāju iekšējās induktivitātes parametrus  $L_a$  un  $L_b$ , bet arī starpvadu induktivitāti  $L_c$ :

$$L = L_a + L_b + L_c, \frac{H}{km} \quad (3.10)$$

Iekšējās dzīslas induktivitāti, neatkarīgi no signāla veida līnijā, var atrast ar cilindrisko funkciju palīdzību:

$$L_a = \frac{\mu}{2} \cdot Q(x) \cdot 10^{-4}, \frac{H}{km} \quad (3.11)$$

kur  $Q(x)$  — cilindriskā funkcija, kas apraksta pretestības pazemināšanos virsmas efekta dēļ.

Iekšējās induktivitātes formulacentrālajai dzīslai, līnijā pārraidot augstfrekvenču signālus, izskatās šādi:

$$L_a = \frac{\sqrt{\mu}}{2d \cdot \sqrt{\pi^3 \cdot f \cdot \sigma_a}} \cdot 10^6, \frac{H}{km} \quad (3.12)$$

un kabeļa ekrānam:

$$L_b = \frac{\sqrt{\mu}}{2D \cdot \sqrt{\pi^3 \cdot f \cdot \sigma_b}} \cdot 10^6, \frac{H}{km} \quad (3.13)$$

Starpvadu induktivitātes lielumu nosaka starpvadu magnētiskā plūsma. Induktivitāti aprēķina pēc formulas:

$$L_c = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot 10^3, \frac{H}{km} \quad (3.14)$$

Kopējā līnijas garuma induktivitāte tiek atrasta no izteiksmes (2.10):

$$L = \frac{101}{\sqrt{f}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\sigma_a} \cdot d} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_b} \cdot D} \right) + 2 \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-4}, \frac{H}{km} \quad (3.15)$$

savukārt koaksiālam kabelim no vara induktivitāti aprēķina pēc precizētas formulas:

$$L = \left[ \frac{66.6}{\sqrt{f}} \cdot \left( \frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) + 2 \ln\left(\frac{D}{d}\right) \right] \cdot 10^{-4}, \frac{H}{km} \quad (3.16)$$

un kabelim ar alumīnija vadītājiem attiecīgi:

$$L = \left[ \frac{82.7}{\sqrt{f}} \cdot \left( \frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) + 2 \ln\left(\frac{D}{d}\right) \right] \cdot 10^{-4}, \frac{H}{km} \quad (3.17)$$

Garuma kapacitāte, atšķirībā no garuma pretestības un induktivitātes, nav atkarīga no pārraidāmā signāla frekvences un to aprēķina pēc cilindrisca kondensatora kapacitātes formulas:

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \frac{F}{km} \quad (3.18)$$

kur  $\varepsilon_r$  — izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība.

Mainīgā elektromagnētiskā lauka iedarbībā kabeļa izolācijā rodas pārorientācijas un dipolu polarizācijas procesi, kas izraisa enerģijas zudumus kapacitīvas strāvas dēļ.

Vadītspēja atspoguļo šo parādību ietekmi un to aprēķina kā zudumu komponenti kondensatora dielektriķī:

$$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta(f), \frac{S}{km} \quad (3.19)$$

kur  $C$  — garuma kapacitāte, F/km;

$\operatorname{tg} \delta(f)$  — izolācijas zuduma leņķa tangenss uzdotajā frekvencē (2.1. tabula).

### 3.3. KKSL sekundārie parametri

Sakaru līnijas sekundārus parametrus aprēķina, izmantojot primāro parametru vērtības. Viļņu pretestību var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$Z_v = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \Omega \quad (3.20)$$

tomēr frekvenču spektrā no 60 kHz vai augstāk  $R \ll \omega L$  un  $G \ll \omega C$ , kas nozīmē, ka pretestību un vadītspēju var neņemt vērā:

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}}, \Omega \quad (3.21)$$

Koaksiālās līnijas viļņa pretestības vērtību pieņemts aprēķināt, neņemot vērā signāla frekvenci:

$$Z_v = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d}\right), \Omega \quad (3.22)$$

Garuma rimšanas koeficienta lielumu noteic enerģijas zudumi kabeļa metālā vadītājos un dielektriķī. To var izteikt no atstarošanas koeficienta (3.17) vai aprēķināt pēc formulas:

$$\alpha = 8.69 \cdot \left( \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{dB}{km} \quad (3.23)$$

Fāzes koeficientu aprēķina no izteiksmes:

$$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{rad}{km} \quad (3.24)$$

Signāla izplatīšanās ātrums ir apgriezti proporcionāls fāzes koeficientam:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi \cdot f}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{km}{s} \quad (3.25)$$

kur  $\beta$  — fāzes koeficients, rad/km.

Saīsinājuma koeficients:

$$K_s = \frac{c}{v}, \quad (3.26)$$

kur  $c$  — gaismas ātrums vakuumā,  $3 \cdot 10^5$  km/s.

Signāla izplatīšanās laiks:

$$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, s \quad (3.27)$$

kur  $L_g$  — sakaru līnijas garums, km.

### 3.4. Secinājumi

1. Apskatītie pusempīriskie modeļi ļauj noteikt koaksiālo sakaru līniju primārus un sekundārus parametrus. Parametru aprēķinu formulas ir apkopotas 3.1. tabulā.
2. Kā ir redzams no 3.1. tabulas, aprēķinos tiek pieņemts, ka koaksiālas līnijas viļņu pretestība un garuma kapacitāte nav atkarīgas no pārraidāmā signāla frekvences, bet garuma pretestība, vadītspēja un rimšanas koeficients, frekvencei palielinoties, pieaug.
3. Saīsinājuma koeficients ir atkarīgs no elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma, kas savukārt ir atkarīgs no frekvences. Aprēķinos nav ņemts vērā, ka saīsinājuma

koeficients izmainās ar laiku, kas ir saistīts ar ārējo faktoru negatīvo ietekmi uz kabeļa izolācijas materiāliem.

**3.1.tabula**

**KKSL parametru aprēķināšanas algoritms**

N.p.k.	Parametrs	Formula	Mērvienības
1.	Garuma pretestība	$R = \frac{\sqrt{f \cdot \mu}}{\sqrt{\pi}} \cdot \left( \frac{1}{\sigma_a \cdot d} + \frac{1}{\sigma_b \cdot D} \right) \cdot 10^6, \frac{\Omega}{km}$	R <sub>0</sub> , Ω/km d, mm a, mm
2.	Garuma induktivitāte	$L = \frac{101}{\sqrt{f}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\sigma_a} \cdot d} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_b} \cdot D} \right) + 2 \ln \left( \frac{D}{d} \right) \cdot 10^{-4}, \frac{H}{km}$	d, mm a, mm
3.	Garuma kapacitāte	$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left( \frac{D}{d} \right)}, \frac{F}{km}$	d, mm a, mm
4.	Garuma vadītspēja	$G = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \frac{S}{km}$	f, Hz C, F/km
5.	Viļņu pretestība	$Z_v = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{D}{d} \right), \Omega$	d, mm a, mm
6.	Garuma rimšanas koeficients	$\alpha = 8.69 \cdot \left( \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \frac{dB}{km}$	R, Ω/km L, H/km C, F/km G, S/km
7.	Fāzes koeficients	$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \frac{rad}{km}$	f, Hz L, H/km C, F/km
8.	Signāla izplatīšanās ātrums	$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \frac{km}{s}$	L, H/km C, F/km
9.	Saīsinājuma koeficients	$K_s = \frac{c}{v}$	c, km/s v, km/s
10.	Signāla izplatīšanās laiks	$T_{iz} = \frac{L_g}{v}, s$	L <sub>g</sub> , km v, km/s

## 4. ŠĶIEDRU OPTIKASSAKARU LĪNIJU MATEMĀTISKIE MODEĻI UN ALGORITMI

### 4.1. Ievads

Optiskā šķiedra — šķiedru optikas sakaru līniju (ŠOSL) elements, kas pārnes signālu. Konstruktīvi to var izskatīt kā apaļu dielektrisku viļņvadu ar serdeni un apvalku (4.1. att.), kurš darbojas optiskajā frekvenču diapazonā.



4.1. att. Optiskās šķiedras kabelis

Optiskās šķiedras serdenis ir ražots no caurspīdīga stikla un paredzēts optiskās enerģijas pārraidei, bet apvalks izgatavots no stikla ar mazāku caurspīdīgumu, kas neļauj enerģijai šķērsot serdeņa robežas un nodrošina pilnas iekšējās atstarošanas nosacījumu [5]. Turklāt apvalks piešķir šķiedrai mehānisku stiprumu un aizsargā gaismas izplatījuma apgabalu no ārējiem traucējumiem.

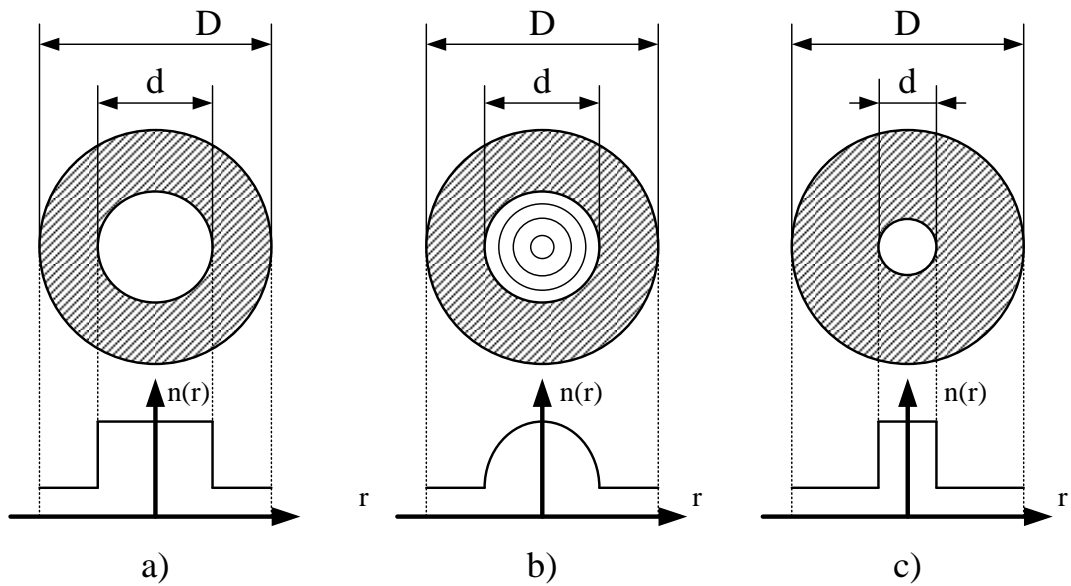
Visplašāk ir izplatīti šādi optisko šķiedru tipi (4.2. att.):

- daudzmodu optiskā šķiedra ar serdeņa laušanas koeficienta pakāpenisko profilu;
- daudzmodu optiskā šķiedra ar serdeņa laušanas koeficienta gradienta profilu;
- vienmodu optiskā šķiedra ar serdeņa laušanas koeficienta pakāpenisko profilu.

Tabulā 4.1. ir doti optisko šķiedru standartizmēri:

4.1. tabula  
Optiskās šķiedras standartizmēri

Optiskās šķiedras tips	Iekšējais diametrs $d$ , $\mu\text{m}$	Ārējais diametrs $D$ , $\mu\text{m}$
Daudzmodu, pakāpeniskais profils	100–200	140–240
Daudzmodu, gradienta profils	50–62.5	125
Vienmodu šķiedra	8–9	125



**4.2. att. Optiskās šķiedras tipi: a) daudzmodu ar pakāpenisko profilu; b) daudzmodu ar gradienta profilu; c) vienmodu**

## 4.2. ŠOSL parametri

Gaismas plūsma izplatās optiskajā šķiedrā saskaņā ar staru modeļa likumsakarībām. Lai signāls varētu izplatīties šķiedrā, kad gaismas stars atstarojās no serdeņa un apvalka robežas, serdeņa laušanas rādītājam jābūt lielākam par apvalka laušanas rādītāju ( $n_1 > n_2$ ). Laušanas rādītāju relatīvā starpība ir viena no svarīgākajiem optiskās šķiedras raksturlielumiem:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad (4.1)$$

kur  $n_1$  — serdeņa materiāla laušanas koeficients;

$n_2$  — apvalka materiāla laušanas koeficients;

Ja gaismas stars, kas izplatās vidē ar laušanas rādītāju  $n_1$ , ienāk sadales robežā ar vidi, kurai ir mazāks laušanas koeficients, tad, krītot uz robežu zem leņķa  $\varphi_1$ , viņš pārlūzīs un turpinās savu ceļu zem leņķa  $\varphi_2$ . Saite starp krituma un laušanas leņķiem tiek noteikta ar Snelliusa likumu:

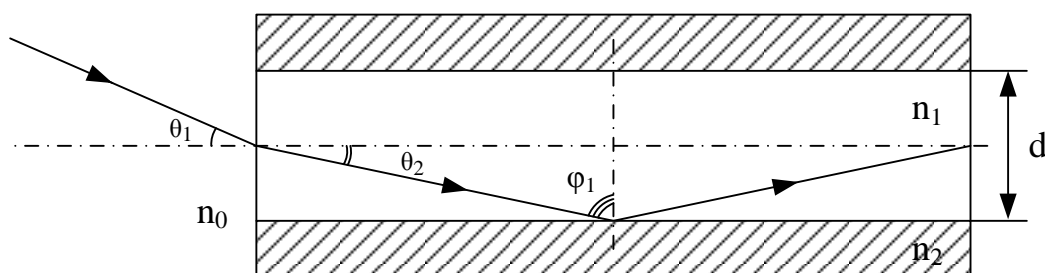
$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (4.2)$$

Saskaņā ar Snelliusa likumu, krituma leņķis  $\varphi_1$ , pie kura  $\varphi_2 = 90^\circ$ , saucās par robežleņķi:

$$\varphi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (4.3)$$

Ja krituma leņķis  $\varphi_1$  ir lielāks par robežleņķi  $\varphi_c$ , tad stars neiet vidē ar mazāku laušanas koeficientu un atstarojas no robežas. Gaismas stari, kas krīt uz robežu zem mazāka leņķa ( $\varphi_1 < \varphi_c$ ) iekļūst apvalkā un rimst tajā.

Viens no svarīgākajiem optisko šķiedru ģeometriskiem parametriem ir skaitliskā apertūra  $NA$ , kura raksturo gaismas stara ievadīšanu šķiedrā. Tā ir saistīta ar maksimālo apertūras leņķi  $\theta_{\max}$ , kad ievadītais signāls vēl atstarojas un izplatās optiskajā šķiedrā (4.3. att.) [8].



4.3. att. Gaismas stara ievadīšana šķiedrā

Skaitlisko apertūru aprēķina pēc formulas:

$$NA = n_c \cdot \sin(\theta_{\max}), \quad (4.4)$$

kur  $n_c$  — laušanas koeficients videi, caur kuru gaismas stars tiek ievadīts šķiedrā;

$\theta_{\max}$  — maksimālais apertūras leņķis,  $^\circ$ .

Tā kā gaismas stars tiek ievadīts šķiedrā caur gaisa spraugu, un gaisa laušanas koeficients ir aptuveni vienāds  $n_0 = 1$ , skaitlisko apertūru var izteikt caur laušanas rādītājiem šādā veidā:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (4.5)$$

Gaismas izplatīšanu šķiedrā raksturo arī normētā frekvence  $V$ , kura tiek noteikta pēc formulas:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda}, \quad (4.6)$$

kur  $d$ — šķiedras serdeņa diametrs,  $\mu\text{m}$ ;

$NA$ — skaitliskā apertūra;

$\lambda$ — darba viļņa garums,  $\mu\text{m}$ .

Maksvela viļņu vienādojumos gaismas stari tiek pielīdzināti viļņiem, un dažādi viļņu veidi (vienādojumu risinājumi) tiek saukti par modam. Optiskajā šķiedrā var eksistēt bezgalīgi liels modu skaits. Turklāt optiskajā viļņvadā izplatās tikai divi viļņu pamattipi: simetriskie ( $\mathbf{E}_{0m}$ ,  $\mathbf{H}_{0m}$ ), kuriem tikai viena gareniskā sastāvdaļa, un nesimetriskie jeb jauktie viļņi ( $\mathbf{EH}_{nm}$ ,  $\mathbf{HE}_{nm}$ ).

Optiskajā šķiedrā var izplatīties gan viena (vienmodu režīms), gan arī vairākas modas (daudzmodu režīms). Maksvela vienādojumu risinājums vienmodu režīmam ļauj atrast vienas modas izplatīšanas kritēriju:  $V < 2.405$  [4]. Normētajai frekvencei pieaugot, modu daudzums sāk strauji palielināties, un pie augstāmvērtībām modu daudzumu šķiedrai ar pakāpenisko profilu var novērtēt pēc formulas:

$$N_M \approx \frac{1}{2} V^2, \quad (4.7)$$

kur  $V$  — normētā frekvence;

Modu daudzums šķiedrai ar parabolisku laušanas rādītāja profilu:

$$N_M \approx \frac{1}{4} V^2, \quad (4.8)$$

Modu skaits optiskajā šķiedrā ir atkarīgs no normētās frekvences, serdeņa diametra, apertūras un viļņa garuma. Modu skaitu var samazināt, palielinot darba viļņa garumu, samazinot apertūru vai serdeņa diametru.

Katrai modai ir kritiskais viļņa garums un kritiskā frekvence  $f_{kr}$ ; elektromagnētiskie viļņi ar frekvenci mazāku par kritisko optiskajā šķiedrā neizplatās. Ja signāla frekvence ir lielāka par kritisko frekvenci ( $f > f_{kr}$ ), elektromagnētiskā lauka enerģija koncentrējas serdeņa iekšienē, bet ja tā ir mazāka — visa enerģija tiek izkliedēta apkārtējā vidē.

Viļņa garumu, pie kura optiskajā viļņvadā izplatās tikai pamata moda, sauc par kritisko.

Kritisko viļņa garumu var aprēķināt no izteiksmes:

$$\lambda_{kr} = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2.405}, \quad \mu\text{m} \quad (4.9)$$

Ja darba viļņagarums ir mazāks par kritisko, tad gaisma šķiedrā izplatās daudzmodu režīmā.

Kritiskā frekvence tiek noteikta kā gaismas ātruma un kritiskā viļņa garuma attiecība:

$$f_{kr} = \frac{c}{n_1 \cdot \lambda_{kr}} \cdot 10^3, \text{ MHz} \quad (4.10)$$

kur  $c$  — gaismas ātrums vakuumā,  $3 \cdot 10^5$  km/s.

Elektromagnētisko viļņu fāžu ātrums  $v_\phi$  optiskajā šķiedrā ar serdeņa laušanas koeficienta pakāpenisko profilu atrodas robežās [4]:

$$\frac{c}{n_1} \cdot 10^3 < v_\phi \leq \frac{c}{n_2} \cdot 10^3, \frac{m}{s} \quad (4.11)$$

kur  $c$  — gaismas ātrums vakuumā,  $3 \cdot 10^5$  km/s;

$n_1$  — serdeņa laušanas rādītājs;

$n_2$  — apvalka laušanas rādītājs.

Tā kā gaismas vadi nav ideāli, tajos rodas optiskā signāla jaudas zudumi. Zudumu lielums tiek novērtēts ar garuma rimšanas koeficientu, kas ir atkarīgs no zudumiem optiskajā viļņvadā un kabelī (4.12). Signāla rimšana ietekmē reģenerācijas iecirkņa garumu.

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_k, \frac{dB}{km} \quad (4.12)$$

kur  $\alpha_v$  — zudumi optiskajā viļņvadā, dB/km;

$\alpha_k$  — optiskā kabeļa zudumi, dB/km.

Kabeļa zudumi ir saistīti ar kabeļa deformāciju, makro un mikro izliekumiem, kas rodas arī ražošanas laikā. Tāpēc ražotājfirmas mēra šķiedras rimšanu uzdotajā viļņa garumā un iegūto lielumu iekļauj kabeļa pasēs datos.

Kopējie pašzudumi (garuma rimšanas koeficients) optiskajai šķiedrai no kvarca stikla tiek izteikti ar formulu:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_R + \alpha_p, \frac{dB}{km} \quad (4.13)$$

kur  $\alpha_a$  — enerģijas absorbcijas zudumi, dB/km;

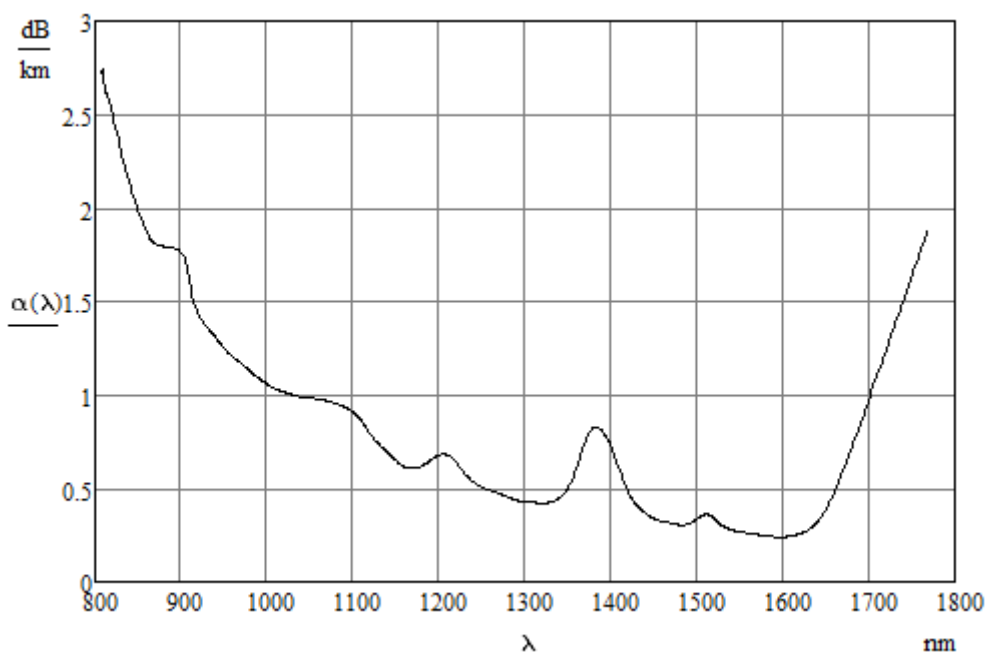
$\alpha_R$  — Releja izkliedes zudumi, dB/km;

$\alpha_p$  — zudumi, kas rodas materiāla piejaukumu dēļ, dB/km.

Enerģijas absorbcijas zudumi optiskajā šķiedrā ir saistīti ar kvarca pašabsorbcijas efektu ultravioletā un infrasarkanā spektrā. Viļņa garumam  $\lambda$  palielinoties (4.4. att.), zudumi kvarcā pieaug [8], un infrasarkanajā diapazonā ( $\lambda > 1.6 \mu\text{m}$ ) kvarca stikls zaudē caurspīdīgumu. Absorbcijas zudumus optiskajai šķiedrai aprēķina pēc formulas:

$$\alpha_a = \frac{n_1 \cdot \pi \cdot \text{tg} \delta}{\lambda} \cdot 8.69 \cdot 10^8, \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (4.14)$$

kur  $\text{tg} \delta$  — viļņvada materiāla zuduma leņķa tangenss, kvarcam  $10 \cdot 10^{-12}$ ;



**4.4.att. Pašzudumu atkarība no viļņa garuma**

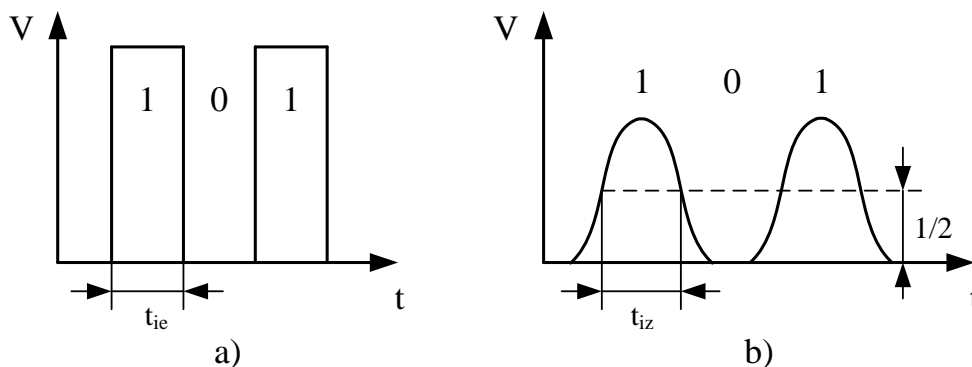
Kā ir redzams, kvarca stiklam pastāv viļņu garumu diapazoni, kuros rimšanas koeficients ir samazināts. Šie diapazoni saucās par caurspīdīguma logiem. Pirmais caurspīdīguma logs — 850 nm, otrais — 1310nm, trešais – 1550nm. Šos viļņu garumusun blakus diapazonus izmanto šķiedru optikas sakaru līnijās.

Izkliedes zudumus nosaka optiskā viļņvada materiāla neviendabīgums. Izkliedes procesā molekulas un daļiņas ģenerē sekundārus viļņus, kad gaismas kvanti krīt uz tām. Ja daļiņas izmēri ir mazāki par viļņa garumu, tad tiek novērota Releja izkliede. Zudumus, kas rodas Releja izkliedes rezultātā aprēķina pēc formulas:

$$\alpha_R = \frac{K_R}{\lambda^4}, \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (4.15)$$

kur  $K_R$  — Releja izkļiedes koeficients, kvarcam  $0.8\text{--}1.5\mu\text{m}^4\cdot\text{dB}/\text{km}$  [4].

Pārraidot signālu šķiedru optikas sakaru līnijā, signālu impulsa forma ievērojami mainās. Jo garāka ir līnija, jo lielāki ir signāla kropļojumi un platāki impulsi līnijas izejā (4.5. att). Šāds impulsu paplašinājums tiek saukts par dispersiju.



**4.5. att. Signāla impulsi optiskās šķiedras sakaru līnijas: a) ieejā; b) izejā**

Noteikta garuma  $L$  šķiedru optikas kabeļa dispersija tiek aprēķināta kā izejas un ieejas (Gausa formas) impulsu ilgumu kvadrātiskā starpība:

$$\tau(L) = \sqrt{t_{iz}^2 - t_{ie}^2}, \text{ s} \quad (4.16)$$

kur  $t_{iz}$  — izejas signāla impulsa laiks, s;

$t_{ie}$  — ieejas signāla impulsa laiks, s.

Dispersiju raksturo trīs pamatfaktori:

- modu izplatīšanas ātrumu atšķirība (starpmodu dispersija);
- viļņvada struktūras īpašības (viļņvada dispersija);
- optiskās šķiedras materiāla īpašības (materiālā dispersija).

Rezultatīva dispersija tiek izskaitļota pēc formulas:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{hr}^2} = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{\text{mat}} + \tau_v)^2}, \frac{\text{ps}}{\text{km}} \quad (4.17)$$

kur  $\tau_{\text{mod}}$  — starpmodu dispersija, ps/km;

$\tau_{hr}$  — hromatiskā dispersija, ps/km.

Starpmodu dispersija eksistē tikai daudzmodu šķiedrās, turklāt tā dominē citu dispersijas veidu starpā. Katrs stars daudzmodu šķiedrā atstarojas no serdeņa robežas zem

dažāda leņķa, laika aizture un izplatīšanās ātrums visiem stariem ir atšķirīgs. Starpmodu dispersijas lielumu optiskajai šķiedrai ar pakāpenisko profilu aprēķina pēc formulas:

$$\tau_{\text{mod}} = \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \cdot 10^{12}, \frac{ps}{km} \quad (4.18)$$

gradienta tipa šķiedrai ar parabolisku laušanas koeficienta profilu:

$$\tau_{\text{mod}} = \frac{n_1 \cdot \Delta^2}{2c} \cdot 10^{12}, \frac{ps}{km} \quad (4.19)$$

kur  $c$  — gaismas ātrums vakuumā,  $3 \cdot 10^5$  km/s.

Serdeņa materiāla laušanas rādītāja atkarība no viļņa garuma noteic materiālās dispersijas lielumu:

$$\tau_{\text{mat}} = \Delta\lambda \cdot M(\lambda), \frac{ps}{km} \quad (4.20)$$

kur  $\Delta\lambda$  — starojuma avota spektra platums (4.2. tabula), nm;

$M(\lambda)$  — īpatnējās materiālās dispersijas vērtība no 4.6. grafika, ps/(nm·km).

#### 4.2. tabula

##### Optisko raidītāju starojuma spektra platuma vērtības

Optiskais raidītājs	Iekšējais diametrs $\Delta\lambda$ , nm
Pusvadītāju lāzers	0.1–4
Gaismas diode	15–50

Viļņvadu dispersiju raksturo ar modas izplatīšanas koeficienta atkarību no viļņa garuma un tā tiek aprēķināta pēc formulas:

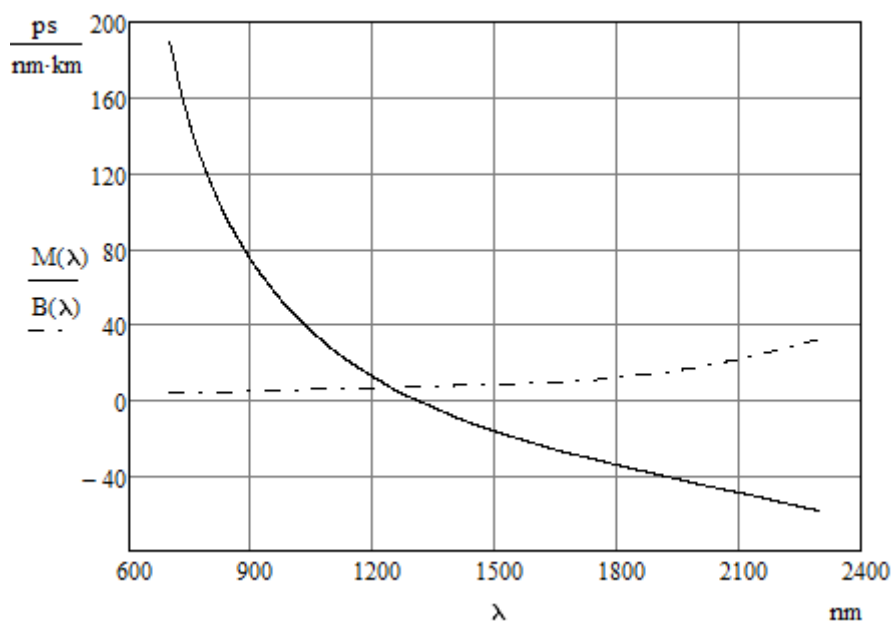
$$\tau_v = \Delta\lambda \cdot B(\lambda), \frac{ps}{km} \quad (4.21)$$

kur  $B(\lambda)$  — īpatnējā viļņvada dispersija (4.22), ps/(nm·km).

$$B(\lambda) = \frac{2n_1^2 \cdot \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot 10^9, \frac{ps}{nm \cdot km} \quad (4.22)$$

Īpatnējās materiālās  $M(\lambda)$  un viļņvada  $B(\lambda)$  dispersijas atkarība no viļņa garuma [8] ir parādīta 4.6. grafikā.

Ir redzams, ka viļņa garumam pieaugot, īpatnējā materiālā dispersija samazinās, un tās raksturlīkne šķērso nulles punktu, bet viļņvada dispersija vienmēr ir pozitīva.



**4.6. att. Īpatnējā materiālā  $M(\lambda)$  un viļņvada  $B(\lambda)$  dispersija**

Vienmodu šķiedrā, kur nav starpmodu dispersijas, pie viļņa garuma 1.3  $\mu\text{m}$  rezultatīvā dispersija tiecās uz nulli, un notiek materiālās un viļņvada dispersiju savstarpēja kompensācija. Šī likumsakarība nosaka vienmodu šķiedru lielu caurlaides joslu.

**4.3. tabula**

**Īpatnējās materiālās un viļņvada dispersijas vērtības kvarca stiklam**

Viļņa garums $\lambda$ , nm	Īpatnējā materiālā dispersija $M(\lambda)$ , ps/(nm·km)	Īpatnējā viļņvada dispersija $B(\lambda)$ , ps/(nm·km)
700	189.58	3.457
800	114.875	3.967
900	73.985	4.579
1000	46.584	5.182
1100	26.743	5.744
1200	12.175	6.315
1300	0.456	7.006
1400	-8.999	7.501
1500	-16.651	8.205
1600	-23.375	8.777
1700	-29.251	9.790
1800	-34.574	11.618
1900	-39.54	14.154
2000	-44.67	17.431
2100	-49.137	21.561
2200	-54.069	26.547
2300	-58.847	32.387

Dispersija ietekmē caurlaides joslas platumu. Optiskās šķiedras caurlaides josla ir frekvenču diapazons, uz kura robežām signāla jauda samazinās par 3 dB. Tapāt kā rimšanas koeficients, caurlaides josla raksturo optiskas sakaru līnijas garumu. Jo mazāka ir caurlaides josla, jo lielāki ir zudumi, pārraidot augstas frekvences signālus.

Caurlaides joslas platumu, normētu uz vienu kilometru, aprēķina pēc formulas:

$$\Delta F = \frac{k_f}{\tau} \cdot 10^{12}, \text{ Hz} \quad (4.23)$$

kur  $k_f$  — signāla impulsu formas koeficients, 0.187–1;

$\tau$  — rezultatīvā dispersija, ps.

### 4.3. ŠOSL reģenerācijas iecirkņa garuma aprēķins

Ir zināms, ka optiskās šķiedras pārraides sistēmas reģenerācijas posma garumu nosaka divi parametri: garuma rimšanas koeficients un summāra dispersija. Vienmodu optiskajām šķiedrām ir raksturīgas labas dispersijas raksturlīknes, un reģenerācijas iecirkņa garums tiek noteikts, ņemot vērā tikai rimšanas zudumus [4].

Papildzudumi pārraides sistēmā radās nesadalāmos savienotājos, sazarotajos, kā arī pašā raidītājā. Nesadalāmo savienotāju skaitu var aptuveni noteikt, izmantojot izteiksmi:

$$n = \frac{L}{l} - 1, \quad (4.24)$$

kur  $L$  — līnijas garums, km;

$l$  — kabeļa būvgarums, km.

Zudumu analīzei sakaru līnijā izmanto enerģijas bilances (drošuma rezerves) jēdzienu, kas nosaka pārraides jaudas un uztvērēja jutības līmeņu starpību. Kopējā enerģētiskā bilance noteic pieļaujamus zudumus līnijā no gala aparatūras līdz, piemēram, pirmajam reģeneratoram. Vispārējā gadījumā avota jaudas lieluma izvēle ir atkarīga no sakaru līnijas garuma, bet uztvērēja jutībai jebkurā gadījumā jābūt vislabākajai.

Reģenerācijas posma garumu aprēķina pēc formulas:

$$L_m = \frac{P_r - P_u - \delta - \alpha_r - \alpha_s \cdot n_s - \alpha_{ns} \cdot n - \alpha_{saz} \cdot n_{saz}}{\alpha}, \text{ km} \quad (4.25)$$

kur  $P_r$  — raidītāja jaudas līmenis, dBm;

$P_u$  — uztvērēja jaudas līmenis, dBm;

$\delta$  — enerģijas rezerve, 3–6 dB;  
 $\alpha_r$  — zudumi raidītājā, dB;  
 $\alpha_s$  — zudumi savienotājā, dB;  
 $n_s$  — savienotāju skaits;  
 $\alpha_{ns}$  — zudumi nesadalāmā savienotājā, dB;  
 $n$  — nesadalāmo savienotāju skaits (4.24);  
 $\alpha_{saz}$  — zudumi sazarotājā, dB;  
 $n_{saz}$  — sazarotāju skaits;  
 $\alpha$  — kabeļa garuma rimšanas koeficients (4.13), dB/km.

#### 4.4. Secinājumi

1. Apskatīti pusempīriskiematemātiskie modeļi, kas ļauj noteikt šķiedru optikas sakaru līnijas primārus un sekundārus parametrus.
2. Optisko sakaru līniju parametru aprēķinu formulas ir apkopotas un sakārtotas pareizā secībā 4.4. tabulā.
3. Garuma rimšanas koeficienta vērtība, kā redzams no (4.13), ir atkarīga no darba viļņa garuma un ir minimāla pie viļņa garumiem 1.31  $\mu\text{m}$  un 1.55  $\mu\text{m}$ .
4. Vienmodu optiskās šķiedras caurlaides josla, kā redzams no formulas (4.23), ir atkarīga no hromatiskas dispersijas vērtības, kura savukārt ir saistīta ar darba viļņa garumu. Ir iespējams izveidot optiskus kanālus ar nulles dispersiju un pietiekami lielu caurlaides joslu, kas ļauj saņemt lielus ciparu signālu pārraides ātrumus līdz 100 Gbit/s.

**4.4. tabula**  
**ŠOSL parametru aprēķināšanas algoritms**

N.p.k.	Parametrs	Formula	Mērvienības
1.	Apvalka laušanas koeficients	$n_2 = n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta}$	—
2.	Skaitliskā apertūra	$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$	—
3.	Raksturojošā frekvence	$V = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda}$	d, μm λ, μm
4.	Kritiskā viļņa garums	$\lambda_{kr} = \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2.405}, \mu m$	d, μm
5.	Kritiskā frekvence	$f_{kr} = \frac{c}{n_1 \cdot \lambda_{kr}} \cdot 10^3, MHz$	λ <sub>kr</sub> , μm
6.	Fāžu ātrums	$v_\phi \leq \frac{c}{n_1} \cdot 10^3$	c, km/s
7.	Garuma rimšanas koeficients	$\alpha = \frac{n_1 \cdot \pi \cdot tg \delta}{\lambda} \cdot 8.69 \cdot 10^8 + \frac{K_R}{\lambda^4}, \frac{dB}{km}$	λ, μm K <sub>R</sub> , μm <sup>4</sup> ·dB/km
8.	Kopējā dispersija	$\tau = \Delta\lambda \cdot \left( M(\lambda) + \frac{2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot 10^9 \right), \frac{ps}{km}$	Δλ, nm M(λ), ps/(nm·km) c, km/s λ, μm
9.	Kanāla caurlaides josla	$\Delta F = \frac{k_f}{\tau} \cdot 10^{12}, Hz$	τ, ps
10.	Reģenerācijas iecirkņa garums	$L_m = \frac{P_r - P_u - \delta - \alpha_r - \alpha_s \cdot n_s - \alpha_{ns} \cdot n - \alpha_{saz} \cdot n_{saz}}{\alpha}$	L <sub>m</sub> , km P <sub>r</sub> , P <sub>u</sub> , dBm α <sub>r</sub> , α <sub>s</sub> , α <sub>ns</sub> , α <sub>saz</sub> , dB α, dB/km

## 5. KABEĻU SAKARU LĪNIJU PARAMETRU APRĒĶINS UN ANALĪZE

### 5.1. Mūsdienīgusakaru kabeļu konstrukcijas materiāli

Sakarā ar plašu optisko šķiedru līniju izplatīšanos, simetrisko un koaksiālo kabeļu izmantošana maģistrālos informācijas pārraides kanālos zaudē aktualitāti. Simetriskus kabeļus pašlaik vēl izmanto analogu telefonsakaru līnijās un vīto pāru veidā datoru cipartīklos, bet koaksiālus kabeļus — televīzijas līnijās unakustiskajās sistēmās.

Varš joprojām kalpo par pamatmateriālu koaksiālo kabeļu centrālajām dzīslām, taču tīrā veidā to izmanto arvien retāk. Simetrisko kabeļu vadītājus izgatavo no tīra vai alvota vara. Dārgajos koaksiālajos kabeļos, kas paredzēti augstfrekvenču signālu pārraidei, var atrast sudrabotu varu (SCC) un sudrabotu kaparotu tēraudu (SCCS). Par optiskā kabeļa pamatelementu kalpo optiskā šķiedra, kas izgatavota no tievacilindriska stikla viļņvada. Viļņvadam ir divslāņu konstrukcija: šķiedras serdenis ir no kvarca, apvalku izgatavo no kvarca vai polimērmateriāla.

Koaksiāla kabeļa ārējais vadītājs ne tikai piedalās informācijas pārraidē, bet arī ekranē sakaru līniju no ārēju elektromagnētisko viļņu iedarbības. Ekrāns parasti tiek izgatavots no vara vai alumīnija appinuma, folijas vai caurules veidā. Appinums labi pasargā no zemfrekvenču traucējumiem, palielina kabeļa lokanību un izturību pret mehāniskiem bojājumiem. Tiek uzskatīts, ka kvalitatīvoskabeļos ārējai instalācijai jāizmanto alvots appinums, jo alvas kārtā aizsargā metālu no korozijas ārējas izolācijas bojājuma gadījumā. Tomēr appinums slikti tiek galā ar augstfrekvenču inducēšanas ekranēšanu, un radiofrekvenču kabeļiem labāk izmantot foliju. Daudzos modernos sakaru kabeļos var reizē atrast pat vairākus ekranēšanas slāņus no appinuma un folijas. Šāda tipa konstrukcija ir raksturīga arī vīto pāru kabeļiem, caur kuriem raيدا augstfrekvenču ciparu signālus.

Mūsdienās visvairāk ir izplatīti koaksiālie kabeļi ar centrālo vadītāju no kaparota tēraudā (CCS, Copper-clad steel) un kaparota alumīnija (CCA, Copper-clad aluminium). Šo tendenci var izskaidrot ar skinefektu, kad augstfrekvenču maiņstrāva kabeļa vadītājos izplatās nevienmērīgi. Pakļaujoties skinefekta likumiem, strāva plūst caur plānu kārtu tuvu vada ārējai

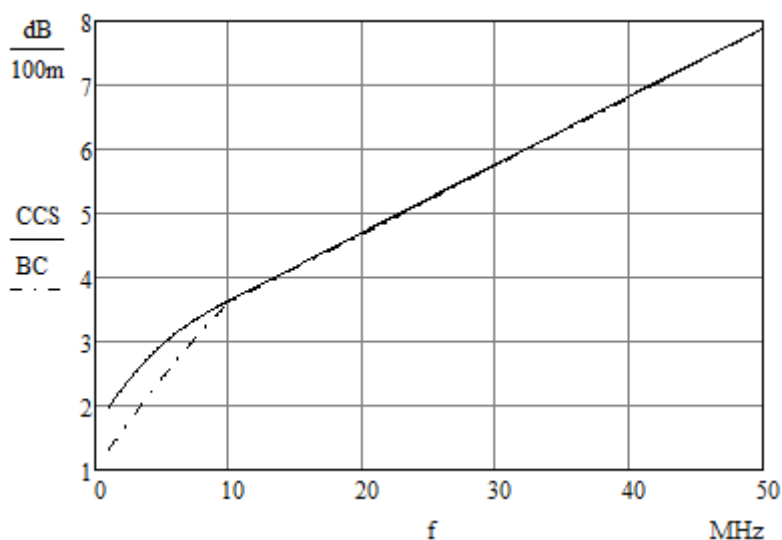
virsmai un vadītāja iekšējā daļa no cita materiāla neietekmē vājinājumu pat ja vadītspēja ir vairākkārt zemāka. Tabulā 3.1. ir doti divu līdzīgo kabeļu garuma rimšanas koeficienti atkarībā no frekvences. Apskatāmie kabeļi ir pilnīgi identiski pēc konstrukcijas, taču vienam centrālais vadītājs ir no tīrā vara (BC), bet otram no kaparota tērauda (CCS).

**5.1. tabula**

**Simetrisko kabeļu garuma rimšanas koeficienta salīdzinājums**

Frekvence, MHz	Garuma rimšanas koeficients, dB/100m	
	Belden 23 AWG 75 Ohm RG-59/U BC	Belden 23 AWG 75 Ohm RG-59/U CCS
1	1.312	1.969
5	2.428	2.953
10	3.609	3.609
50	7.874	7.874
100	11.155	11.155
200	16.077	16.077
400	22.97	22.97

Kā ir redzams grafikā (5.1. att.), frekvenču diapazonā līdz 10 MHz zudumi kabelim ar bimetālisko vadītāju ir nedaudz lielāki, nekā analogam ar dzīslām no tīrā vara, taču augstajās frekvencēs šie lielumi jau ir vienādi.



**5.1. att. Simetrisko kabeļu garuma rimšanas koeficienta salīdzinājums**

Tādējādi, projektējot sakaru līniju no kabeļiem ar plakētiem vadītājiem, aprēķinos

izmanto fizikālo parametru vērtības atbilstošam metālam vai sakausējumam: ārējas kārtas materiālam, ja līnija ir paredzēta augstfrekvenču signālu pārraidei, vai pamatmateriālam, ja vados plūdīs līdzstrāva. Algotām dzīslām alvas klātbūtni pirmā tuvinājumā aprēķinos var neņemt vērā.

Fiziski uzputotu porainu polietilēnu (PEEG) izmanto kā dielektriķi koaksiālo kabeļu lielākajā daļā. Šim materiālam ir šūnu struktūra, kas aiztur mitrumu un neļauj tam iekļūt izolācijas iekšienē, tāpēc dielektriskā caurlaidība paliek nemainīga pat 15 gadu garumā, un izturība tāda pati kā cietam polietilēnam. Lai nodrošinātu viļņu pretestības viendabīgumu līnijā, veido vairāku kārtu izolācijas konstrukciju no plānā cieta un uzputota polietilēna. Kālētāko alternatīvu fiziski uzputotam polietilēnam var izmantot ķīmiski uzputotopolietilēnu (PPE), kas ir trausls un neizcēlās ar ilgderīgumu.

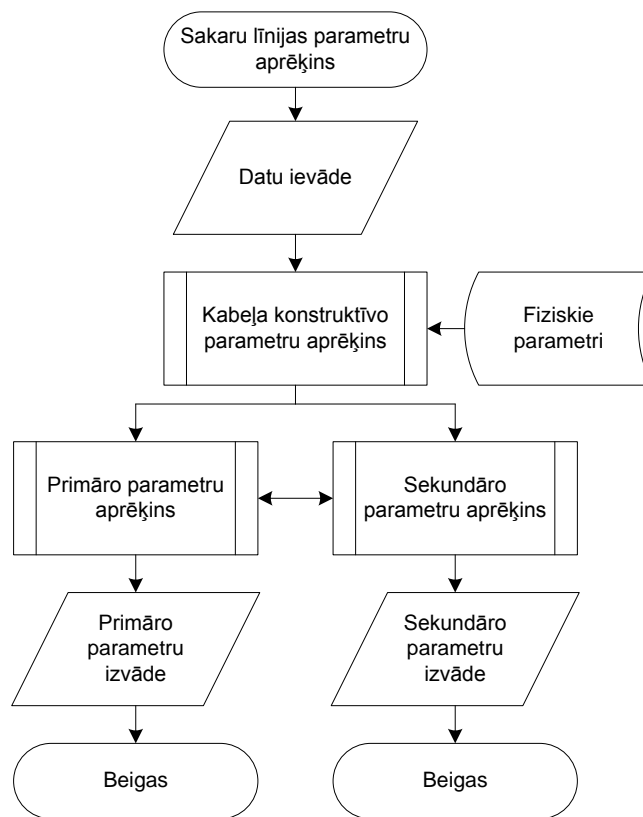
Sakaru kabeļu apvalkus galvenokārt izgatavo no polivinilhlorīda, polietilēna vai fluoroplasta. Pēdējā laikā ārējā izolācija bieži tiek veidota no polimēriem, kas neizdala halogēnus un dūmus paaugstinātas temperatūras iedarbības rezultātā (LSZH, LSOH).

## **5.2. Kabeļu sakaru līniju parametru inženieraprēķini**

Kabeļu sakaru līnijas projektēšana prasa skaidru priekšstatu par signālu pārraides parametru lielumiem plašā darba frekvenču spektrā. Šie raksturlielumi palīdz novērtēt konkrētā kabeļa piemērotību projektā noteiktajām prasībām. Inženieraprēķinu metode, kas aprakstīta šī darba 2., 3. un 4. nodaļā, ļauj aprēķināt kabeļlīnijas parametrus, ja ir zināmi kabeļa konstrukcijas izmēri un materiāli, no kuriem tas ir izgatavots. Dotās formulas palīdz noteikt zudumus sakaru kabelī, novērtēt kabeļa maksimālo garumu, pārraidot tajā noteiktās frekvences signālus. Vislielākā uzmanība pievērsta primāro un sekundāro parametru frekvenču dispersijai, t.i., parametru izmaiņai atkarībā no pārraidāmā signāla frekvences.

Simetrisko, koaksiālo un šķiedru optikas kabeļu parametru aprēķinu automatizēšanai tika izstrādātas trīs programmas Mathcad inženieraprēķinu vidē. Programmas ļauj uzreiz pēc kabeļa konstrukcijas parametru ievadīšanas ieraudzīt primāro un sekundāro parametru lielumus, SKSL un KKSL gadījumā aplūkot to frekvenču dispersijas grafikus, redzēt lielumu atkarību no līnijas garuma. Tas atvieglo kabeļa līnijas projektēšanas uzdevumu, jo pazūd sākotnējā nepieciešamība eksperimentāli noteikt kabeļa garuma parametrus un raksturlīknes.

Sakaru līnijas parametru aprēķina vispārējais algoritms ir redzams 5.2. attēlā.



5.2. att. Sakarų līnijas parametru aprēķina algoritms

Kabeļa materiālu raksturojošo lielumu un konstrukcijas parametru ievadīšanai atvēlēta katras programmas dokumenta pirmā lappuse. Simetriskā kabeļa sākumdati, kā tie izskatās Mathcad programmā, ir redzami 5.3. attēlā.

**Dots:**

$d := 0.64$	mm	vada dzīslas diametrs
$\delta := 0.265$	mm	vada izolācijas biezums (fāzes izolācija)
$\Delta := 0$	mm	vada joslizolācija
$h := 65$	mm	savijuma solis
$k_{st} := 0$		savijuma tips: 0 — pāra 1 — dubultpāra 2 — zvaigžņu 3 — dubultzvaigžņu
$\sigma := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	vadu materiāla elektrovadītspēja
$\rho := 0.0175$	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	vadu materiāla īpatnēja pretestība
$\epsilon_r := 1.38$		izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība

5.3. att. SKSL parametru aprēķina programmas sākumdati

Visi līnijas parametru lielumi un grafīki Mathcad programmā tiek aprēķināti un konstruēti automātiski.

### 5.2.1. SKSLinženieraprēķinu un standarta parametru salīdzināšana

Tiek apskatīts Belden 7701 NH (4. pielikums) simetriskais kabelis, kas sastāv no divām veselām vara dzīslām ar diametru 0.64 mm (AWG 22) un izolāciju no poraina polietilēna. Vadītāju izolācijas minimālais biezums — 0.23 mm. Kabeļa tehniskajā aprakstā, neskaitot informāciju par kabeļa konstrukciju un mehāniskām īpašībām, ražotājs norāda dotā kabeļa elektriskus parametrus noteiktajās frekvencēs. Simetrisko kabeļu sakaru līnijas galvenie parametri ir viļņu pretestība, garuma rimšanas koeficients, pretestība līdzstrāvai un maiņstrāvai, kapacitāte un saīsinājuma koeficients.

Sakaru līnijas aprēķinātie parametri (1. pielikums) un parametri no kabeļa datu lapas tiek salīdzināti 5.2. tabulā. Ir vērts pievērst uzmanību tam, kādā veidā ražotājadokumentācijā tiek dota pretestība līdzstrāvai. Dotajā gadījumā dokumentācijā pretestība ir norādīta tikai vienam vadītājam, bet aprēķinu piemērā pretestība tiek noteikta kabeļa vadītāju pārim. Salīdzināšanas ērtībai garuma pretestība ir pārrēķināta vienam vadītājam un visu parametru mērvienības tika vienādotas.

### 5.2. tabula

#### SKSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

Parametrs	Frekvence, MHz	Aprēķinātā vērtība	Standarta vērtība	Mērvienība
Viļņu pretestība	—	99.793	100	$\Omega$
Garuma pretestība līdzstrāvai	—	54.67	55	$\Omega/\text{km}$
Garuma kapacitāte	—	44.627	46	pF/m
Garuma rimšanas koeficients	0.772	1.331	1.3	dB/100m
	1	1.511	1.5	
	4	3.047	3.1	
	10	4.886	4.9	
	16	6.251	6.3	
	20	7.034	6.9	

Kā ir redzams 5.2. tabulā, viļņu pretestības, garuma pretestības, kapacitātes un rimšanas koeficienta aprēķinātas vērtības nepārsniedz šo parametru standarta lielumus. Kopumā kabeļa Belden 7701 NH aprēķinātie un standarta parametri savā starpā atšķīrās ne vairāk par 5%, kas liecina par izmantoto matemātisko modeļu piemērotību izmantošanai simetrisko sakaru kabeļu līniju projektēšanas inženierpraksē.

Ciparu informācijas pārraidi caur simetrisko kabeļu sakaru līnijām var apskatīt, balstoties uz xDSL tehnoloģiju iespējām. xDSL tehnoloģijas ļauj izmantot abonenta līnijas lielā ātruma datu apmaiņai pa vienu vai vairākiem vadu pāriem, kamēr Ethernet tehnoloģijas realizācijas nepieciešami vismaz divi vadītāju pāri.

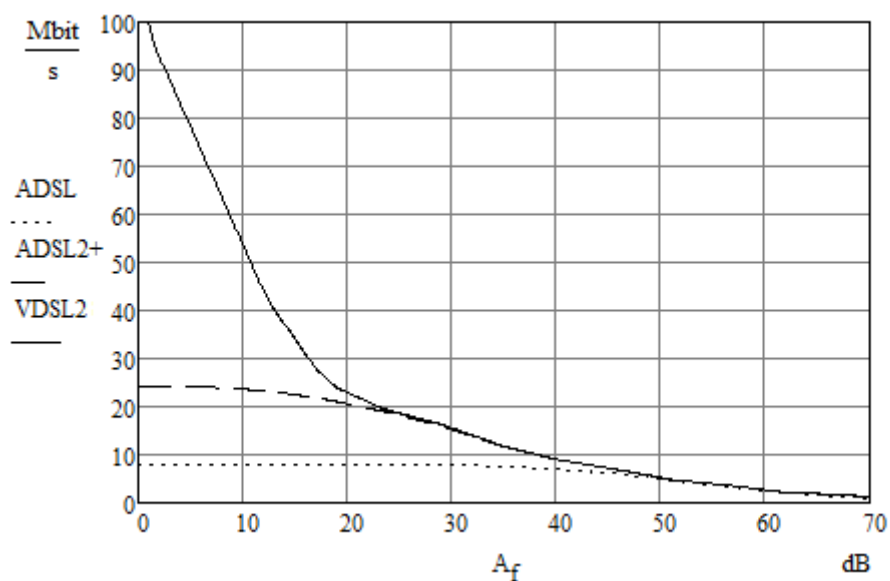
Belden 7701 NH kabelim ir divi vara vadi, kas atļauj izmantot to ciparu informācijas pārraidei, izmantojot kādu no xDSL tehnoloģijām.

Patlaban xDSL tehnoloģiju saime sevī iekļauj lielu standartu skaitu, daļa no kuriem jau ir novecojusi un neapmierina mūsdienu patērētāju prasības. Šodien ir visvairāk izplatīti ADSL, VDSL un citi šo standartu paplašinājumi (5.3. tabula) [2]. VDSL2 standarts ir viens no pēdējiem izstrādātiem un pēc realizācijas iespējām ir universāls: tiek piedāvāti dažādi profili ar atšķirīgām nesējfrekvencēm (8.5 MHz, 8.832 MHz, 17.664 MHz, 30 MHz) un attiecīgiem datu pārraides ātrumiem.

**5.3. tabula**  
**xDSL standarti**

xDSL standarts	Maksimālais lejupielādes ātrums, Mbit/s	Maksimālais augšupielādes ātrums, Mbit/s	Frekvenču diapazona augšējā robeža, MHz
ADSL	8	1.3	1.1
ADSL2	12	1.216	1.1
ADSL2+	24	1.216	2.2
VDSL	55	3	12
VDSL2	50–200	50–200	8.5–30

ITU G.992 un ITU G.993 kategoriju standarti apraksta ADSL, VDSL tehnoloģijās izmantojamus informācijas pārraides principus un maksimālus teorētiskus ātrumus [2]. Balstoties uz šo informāciju, ja ir zināmi konkrētā kabeļa rimšanas parametri, kopējais garums un maksimālie pārraides ātrumi noteiktajos posmos, var noteikt ātruma atkarību no zudumiem līnijā. Ar šo paņēmienu tika iegūtas maksimālo teorētisko ātrumu līknes (5.4. att.) priekš ADSL, ADSL2+ un VDSL2 (17a profils).



#### 5.4. att. xDSL standartu lejupielādes ātruma atkarība no zudumiem līnijā

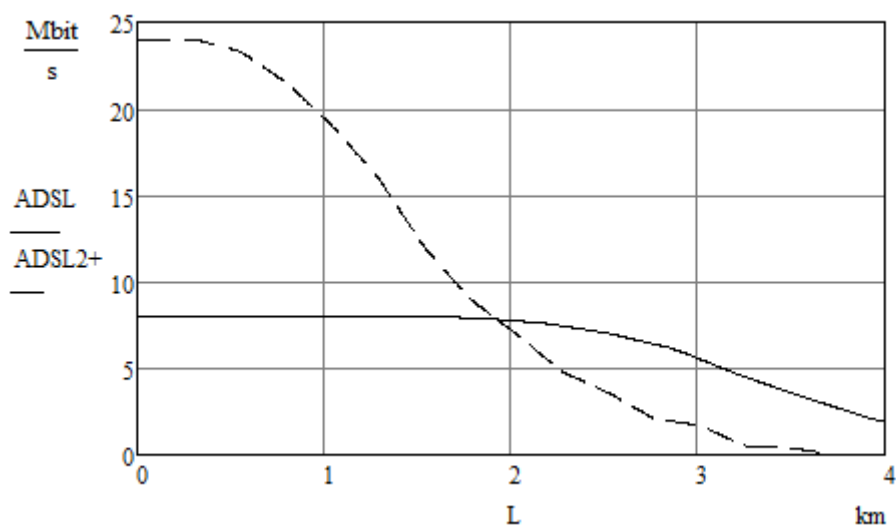
Lejupielādes ātruma un zudumusavstarpējās atkarības grafiks dod iespēju novērtēt ciparu informācijas pārraides ātrumus un noteikt maksimālu attālumu starp sakaru tīkla mezgliem. Šī uzdevuma risināšanai vispirms jāaprēķina kabeļa garuma rimšanas koeficients xDSL standartam uzdotajā frekvencē. Iegūtajam rimšanas koeficienta lielumam 5.4. grafikā tiek atrasts attiecīgais meklējamais maksimālais ātrums. Rimšanas parametru aprēķins Belden 7701 NH kabelim ADSL, ADSL2+ un VDSL2 standartu izmantošanas ietvērās ir dots 5.4. tabulā.

#### 5.4. tabula

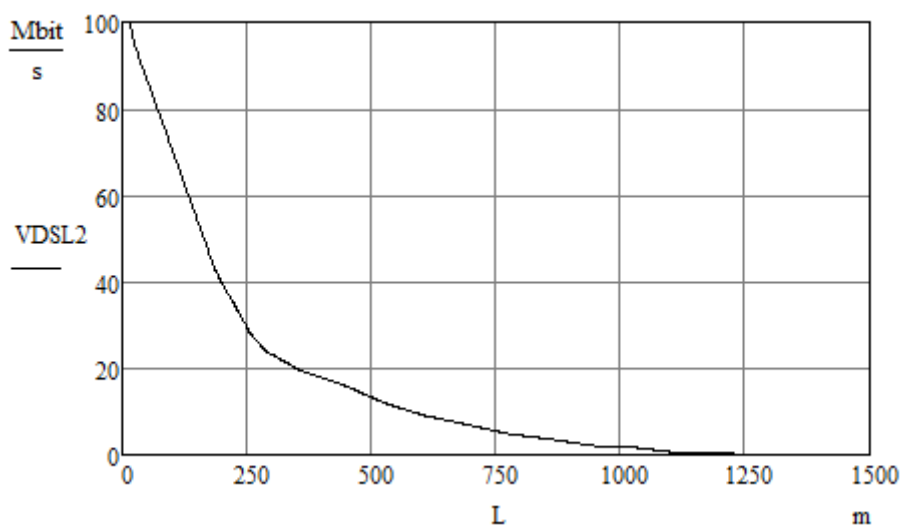
##### xDSL standartu maksimālo lejupielādes ātrumu salīdzinājums

xDSL standarts	Maksimālā frekvence, MHz	Garuma rimšana, dB/100m	Maksimālais lejupielādes ātrums (100m), Mbit/s
ADSL	1.1	1.584	8
ADSL2+	2.2	2.249	24
VDSL2 17a	17.664	6.586	70.559

Belden 7701 NH kabelim raksturīgie datu pārraides ātrumi, atkarībā no attāluma, ir labi pārskatāmi 5.5., 5.6. grafikos.



**5.5. att. Lejupielādes ātruma atkarībā no līnijas garuma ADSL standartiem**



**5.6. att. Lejupielādes ātruma atkarībā no līnijas garuma VDSL2 standartam**

No 5.2. tabulasdatiem var secināt, ka, pārraidot ciparu signālus ar platu frekvenču spektru pa simetriskā kabeļa līniju, rimšanas koeficienta palielināšana vairāk ietekmē augstāko harmoniku rimšanu. Par to liecina arī grafiki 5.5. un 5.6. grafiki: palielinoties līnijas garumam un zudumiem tajā, signāla harmonikas tiek vājinātas un neizbēgami kropļotas, līdz ar ko samazinās pārraides ātrums un maksimālais līnijas garums. Maksimālais lejupielādes ātrums ADSL standartam saglabājās 2 km attālumā, ADSL2+ standartā ātrums strauji samazinās jau 400 m garai sakaru līnijai. VDSL2 standarts paredz simetriska kabeļa izmantošanu īsos attālumos un spēj nodrošināt tikai 70 Mbit/s ātrumu 100 m gara līnijā.

Pārraidot ciparu informāciju, izmantojot Ethernet tehnoloģiju, nepieciešams ņemt vērā maksimālo rekomendēto segmenta garuma vērtību, kas ir norādīta standartos: neekranētā vītā pāra kabeļa segmenta garums Fast Ethernet un Gigabit Ethernet tīklos nedrīkst pārsniegt 100 m. Ir svarīgi pievērst uzmanību arī kabeļa garuma rimšanas parametram uzdotajā attālumā, jo pie 20 dB zudumiem signāla jauda līnijas izejā jau ir simtreiz mazāka, nekā signāla jauda līnijas ieejā.

### 5.2.2. KKSL inženieraprēķinu un standarta parametru salīdzināšana

Koaksiālas kabeļu sakaru līnijas parametru salīdzināšanai tika izvēlēts Belden CX3C1 koaksiālais kabelis (5. pielikums), kas paredzēts izmantošanai augstfrekvenču signālu (līdz 2.15 GHz) pārraides sistēmās. Kabeļa centrālais vadītājs ir vara dzīsla, ekrāns — vara folija. Centrālā vadītāja diametrs ir 3.38 mm. Iekšējais dielektriķis ir izgatavots no fiziski uzputota polietilēna, iekšējās izolācijas diametrs — 14.9 mm.

Koaksiālās līnijas svarīgākie parametri ir viļņu pretestība, garuma rimšanas koeficients un saīsinājuma koeficients. Belden CX3C1 kabeļa aprēķinātie parametri ir apkopoti 5.5. tabulā, kur tie tiek salīdzināti ar parametriem no šī kabeļa datu lapas. Veiktais parametru aprēķins ir dots 2. pielikumā.

5.5. tabula

#### KKSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

Parametrs	Frekvence, MHz	Aprēķinātā vērtība	Standarta vērtība	Mērvienība
Viļņu pretestība	—	74.959	75	$\Omega$
Garuma kapacitāte	—	52.8	54	pF/m
Garuma rimšanas koeficients	5	0.394	0.4	dB/100m
	50	1.283	1.3	
	100	1.845	1.8	
	200	2.674	2.6	
	400	3.928	3.9	
	600	4.968	4.8	
	800	5.909	5.7	
	1000	6.795	6.5	

Kā ir redzams, aprēķinātie viļņu pretestības un garuma rimšanas koeficienta parametri atšķirās no Belden CX3C1 kabeļa standarta parametru lielumiem ne vairāk par 5%, kas ļauj izmantot aprēķinos izmantotus modeļus koaksiālo kabeļlīniju projektēšanas inženierpraksē.

No 3.5. tabulas seko, ka, palielinot garuma rimšanas koeficientu, visas augstākās harmonikas koaksiālajā līnijā rīms arvien straujāk, kā rezultātā pārraidāmais ciparu signāls tiks kropļots.

Šobrīd koaksiālus kabeļus ārkārtīgi reti izmanto ciparu informācijas pārraidei. 10Base-5, 10Base-2 un 10Broad-36 pakešu datu pārraides standarti bija izstrādāti vēl pagājušā gadsimta 80. gados, atbalstīja datu pārraidi ar ātrumu līdz 10 Mbit/s 500 m, 185 m, 3.6 km attālumā attiecīgi. Mūsdienās šī tehnoloģija tiek uzskatīta par novecojusi.

### 5.2.3. ŠOSL inženieraprēķinu un standarta parametru salīdzināšana

Šķiedru optikas sakaru līnijas parametru aprēķina analīzei tika izmantots Belden LT096FM vienmodu optiskais kabelis (6. pielikums). Kabelis satur 96 optiskās šķiedras, katras šķiedras diametrs ir 8.6 μm. Belden LT096FM kabelis ir paredzēts signālu pārraidei pie 1310 nm vai 1550 nm viļņu garuma.

Kabeļa maksimāli pieļaujamas parametru vērtības, kas norādītas ražotāja datu lapā, un Mathcad programmā aprēķinātie parametri ir apkopoti 5.6. tabulā. Parametru aprēķins ir apskatāms 3. pielikumā.

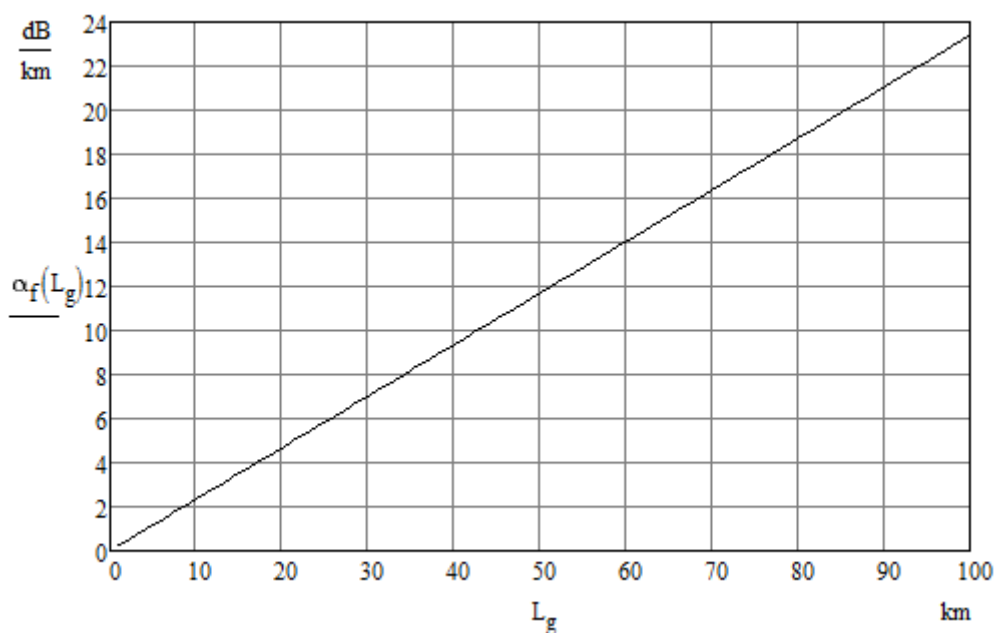
5.6. tabula

#### ŠOSL aprēķināto un standarta parametru salīdzinājums

Parametrs	Aprēķinātā vērtība	Standarta vērtība	Mērvienība
Kritiskā viļņa garums	1.232	1.26	μm
Garuma rimšanas koeficients	0.234	0.25	dB/km
Optiskās šķiedras dispersija	15.305	18	ps/km

No 5.6. tabulas ir redzams, ka aprēķinātas parametru vērtības nepārsniedz vairāk kā 15% no ražotāja noteiktiem lielumiem.

Grafikā 5.7. ir apskatāmi dotā šķiedru optikas kabeļa ar rimšanu saistītie zudumi atkarībā no kabeļa kopējā garuma.



**5.7. att. Šķiedru optikas kabeļa zudumi atkarībā no līnijas garuma**

Kā ir redzams 5.7. grafikā, kabeļa zudumi pat 100 km attālumā nepārsniedz 24 dB. Taču praksē līnijas maksimālā garuma noteikšanai jāievēro virkne nosacījumu. Ir zināms, ka papildzudumi ir gan savienotājiem, gan signāla raidītājam, turklāt jānodrošina sakaru sistēmas drošuma rezerve. Šīm nolūkam parasti aprēķina reģenerācijas iecirkņa garumu (4.3. nodaļa). Šķiedru optikas līnijas parametru aprēķinos (3. pielikums) ir noteikts vienkāršās sakaru sistēmas reģenerācijas iecirkņa garums — 80.86 km. Šajā attālumā zudumi kabeļi ir 18.9 dB, kas atbilst signāla jaudas samazināšanai 78 reizēs.

Nemot vērā visus aprēķinus, var secināt, ka aprakstītie šķiedru optikas kabeļu līniju modeļi un parametru aprēķināšanas algoritmi ir precīzi un tos var pielietot sakaru sistēmu projektēšanā.

## **6. MŪSDIENU HETEROGĒNA TELEKOMUNIKĀCIJU TĪKLAMODELĒŠANA UN EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE**

(Šī nodaļa ir sagatavots kopā ar promocijas V.Skudnova)

### **6.1. Uzdevuma nostādne**

Informācijas tehnoloģiju straujā attīstība pastāvīgi izraisa dzelzceļa transporta primāro un sekundāro heterogēnu sakaru tīklu modernizāciju un pilnveidošanos. Pēdējos gados plaši tiek pielietotas optisku un bezvadu tīklu tehnoloģijas, kurās izmanto modernās ciparu informācijas apstrādes un analogu signālu pārraides metodes. Turklāt tiek realizēta ne tikai datu un balss, bet arī automatizācijas un tālvadības signālu pārraide.

Heterogēnu tīklu primāras projektēšanas posmā parasti rodas nepieciešamība pēc tīklu modeļiem ar modernām, perspektīvām tehnoloģijām. Šajā sakarā tika noformulēts uzdevums izveidot eksperimentālu heterogēna tīkla modeli, kas sevī apvieno:

- tīkla ribas: šķiedru optikas un vara kabeļu sakaru līnijas;
- tīkla mezglus: elektriskus un optiskus multipleksorus, komutatorus u. c.;
- tīkla galiekārtas: ciparu telefona aparātus, personālus datorus;
- informācijas tehnoloģijas: PDH vai SDH, IP, VoIP.

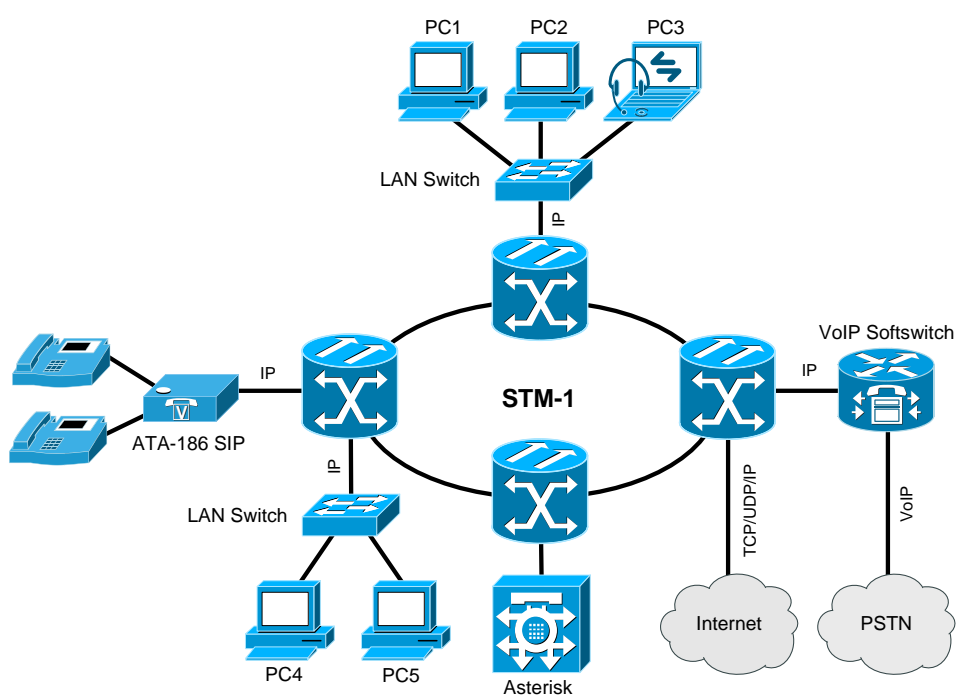
### **6.2. Heterogēnā tīkla modelēšana un optimizācija**

Organizētais heterogēnais tīkls (6.1. att.) [7] pēc savas konstrukcijas ir maksimāli līdzīgs reāliem tīkliem, kurus savā infrastruktūrā izmanto Latvijas vadošie uzņēmumi (Latvijas Dzelzceļš, LMT, Lattelecom u.c.).

Uzbūvētā heterogēna tīkla elementi:

- tīkla ribas: vienmodu šķiedru optikas kabeļi ( $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ ,  $\alpha = 0.22\text{dB/km}$ ), vara koaksiālie kabeļi ( $Z_v = 70\Omega$ ), vara simetriskie kabeļi ( $Z_v = 120\Omega$ );
- tīkla mezgli: optiskie multipleksori SURPASS hiT7020, komutatori ALOE Systems MVTs Softswitch un Digium Asterisk Softswitch;

- tīkla galiekārtas: analogu telefonu adapteris Cisco ATA 186, VoIP programmtelefoni Zoiper un CounterPath X-Lite, personālie datori tīkla monitoringam un kontrolei ar programmnodrošinājumu TNMS-M SURPASS hiT7020 3.2.2 LCT, ciparu analizators Wandel & Goltermann ANT-20E, optiskās jaudas mērītājs;
- tīkla interfeisi: LC konektori optisko multipleksoru SFP moduļu savienojumam, FC konektori savienojumam ar SDH analizatoru un testerī, BNC konektori koaksiāliem kabeļiem, 8P8C un 6P6C konektori vītā pāra kabeļiem.



**6.1. att. Heterogēnā tīkla shēma**

STM-1 tīklam ir dubultā gredzena topoloģija, katrs SURPASS hiT7020 multipleksors ir savienots ar diviem blakus esošajiem multipleksoriem. Multipleksoros ir instalēti optiskie raidzīvētāji (6.2. att) — STM-1 SFP moduļi Fiberxon FTM-3101C-L15-A ar LC konektoriem.



**6.2. att. Optiskais multipleksors ar instalētiem SFP moduļiem**

Fiberxon FTM-3101C-L15-A vienmodu SFP moduļa parametri ir apkopoti tabulā.

**6.1. tabula**

**FTM-3101C-L15-A SFP moduļa parametri**

Parametrs	Parametra vērtība	Mērvienība
Darba viļņa garums	1310	nm
Pārraides līnijas garums	15	km
Starojuma avota spektra platums	< 4	nm
Raidītāja jauda	-15-(-8)	dBm
Uztvērēja jūtība	-34	dBm

### **6.3. Heterogēnā tīkla darbības princips**

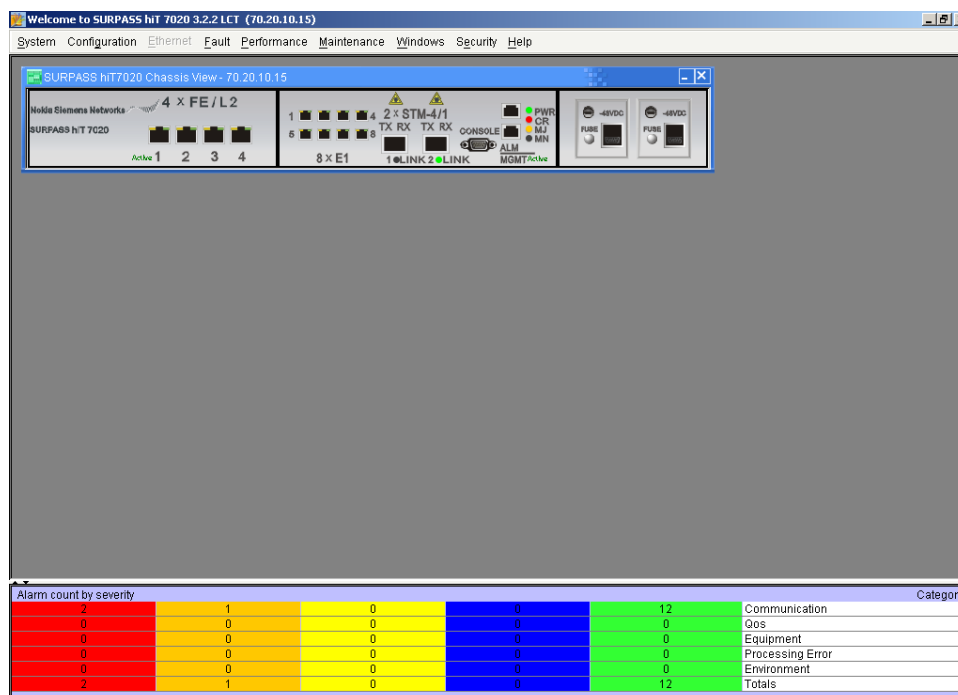
VoIP (Voice-over-IP) tehnoloģijas nodrošināšanai kalpo Asterisk un MVTs serveri. VoIP ir balss sakaru ciparu sistēma, kas spēj pārraidīt skaņas informāciju bez ievērojamiem zudumiem un ir balstīta uz IP pakešu komutācijas principa.

Balss signālu pārraide notiek no VoIP telefona caur STM-1 tīklu, kur trafiks nonāk Asterisk Softswitch serverī. Asterisk ir telefona centrāles programmatūra ar atvērto pirmkodu [1]. Tā atbalsta visas standarta automatiskās telefona centrāles iespējas un uztur lielu VoIP protokolu skaitu. Asterisk izpilda telefona centrāles pamatfunkcijas un caur SDH tīklu nosūta izsaukumu MVTs Softswitch serverim, kurā notiek maršrutizācija un zvana pārraide publiskajā komutējamajā telefonu tīklā (PSTN).

Datu pārraide no personāla datora notiek caur lokālo un STM-1 tīklu, kur trafiks nonāk globālajā internetā ar maršrutētāja palīdzību. Datori ir apvienoti lokālajos tīklos un ir pieslēgti SDH tīklam caur Ethernet interfeisu.

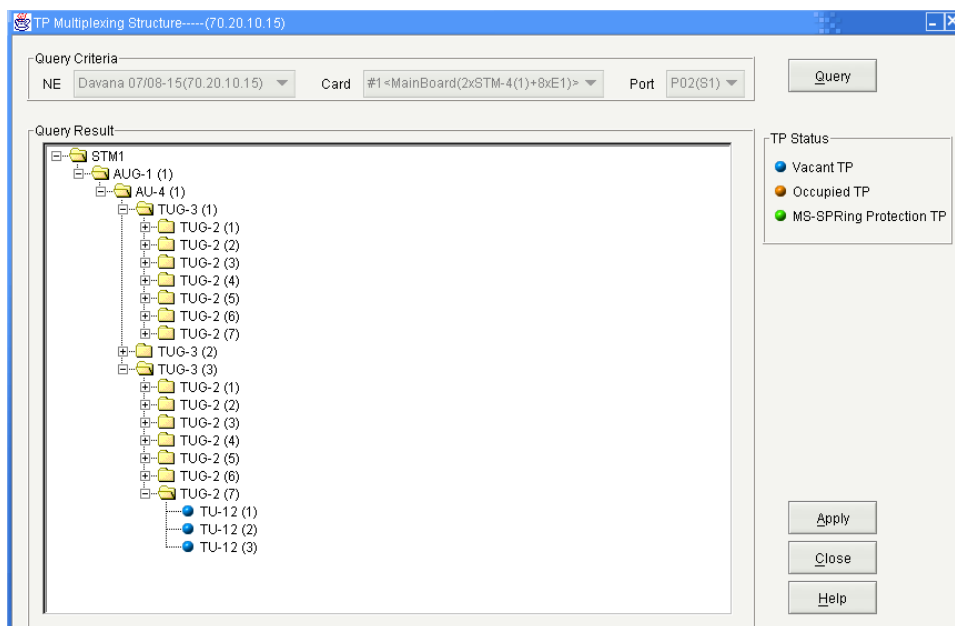
## 6.4. Heterogēnā tīkla monitoringa un mērījumu metodes

SURPASS hiT7020 optisko multipleksoru iestādīšanai un tīkla pārraudzīšanai tika izmantota ražotāja programmatūra TNMS-M SURPASS hiT7020 3.2.2 LCT (6.3. att.). Lai pieslēgtos vienai no SURPASS ierīcēm, ir nepieciešams savienot personālo datoru, kurā ir uzstādīta ražotāja programmatūra, ar ierīces “management” interfeisu, izmantojot 8P8C pačkordu. Kopš visi multipleksori ir apvienoti vienā STM-1 tīklā, no jebkura mezgla var pieslēgties visiem multipleksoriem.



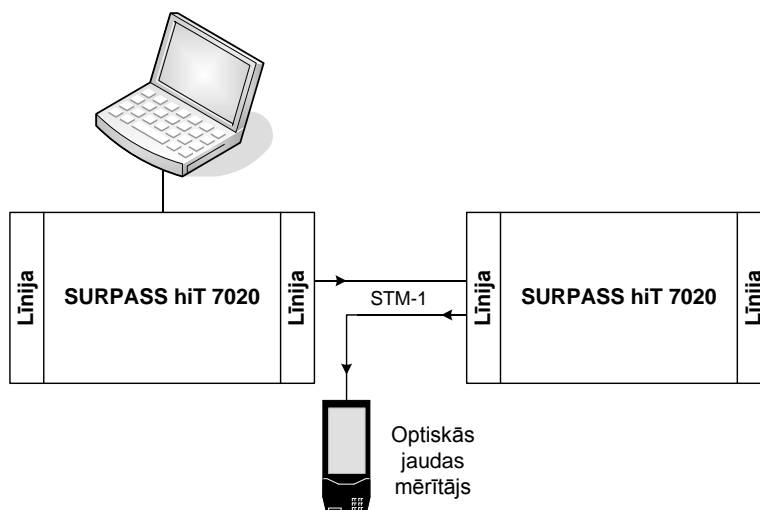
6.3. att. SURPASS hiT7020 vadības panelis

TNMS-M SURPASS hiT7020 3.2.2 LCT programmatūra pilnā mērā sniedz informāciju par datu multipleksēšanu (un demultipleksēšanu) virtuālajos konteineros (VC-4, VC-12 u. c.), kad informācija tiek pārraidīta no personāla datora caur STM-1 tīklu. Tīkla multipleksēšanas režīma piemērs ir redzams 6.4. attēlā.



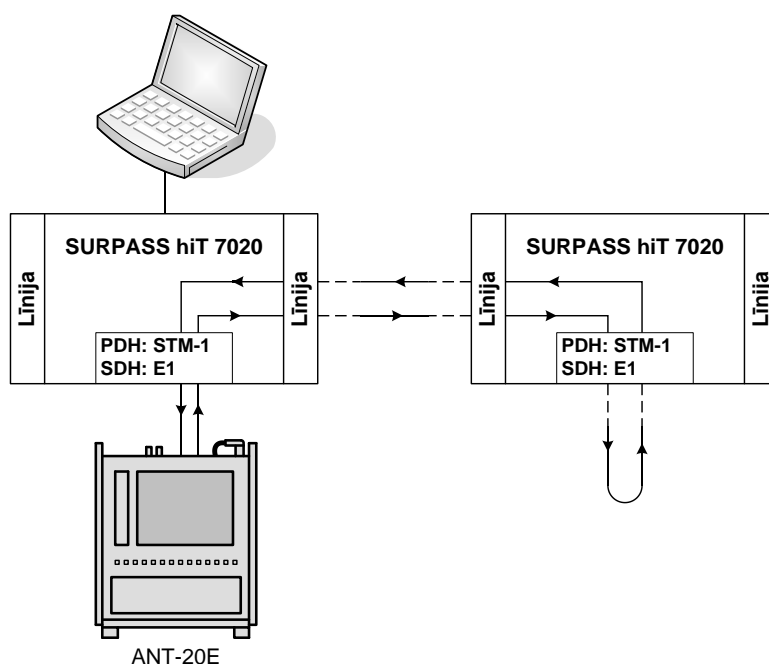
**6.4. att. STM-1 multipleksēšanas virkne**

Optiskā raidītāja jaudas līmenis noteic kabeļa līnijas, kas savieno tīkla mezglus, maksimālo garumu. Šīm parametram ir diezgan lielā nozīme un to var izmērīt, izmantojot optiskās jaudas mērītāju (6.5. att.).



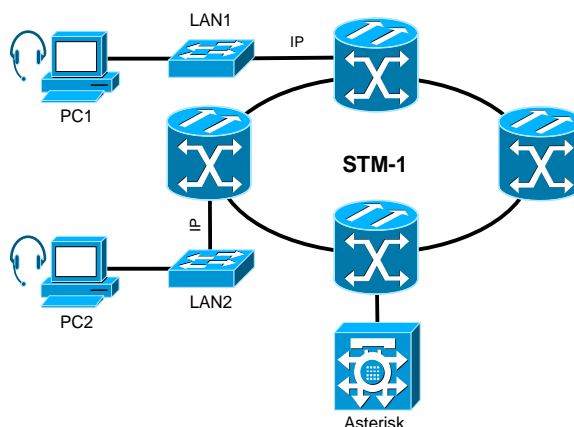
**6.5. att. Optiskās jaudas mērīšanas shēma**

Tīkla kopējās darbības noteikšanai tika izmantots tīkla testeris — Wandel & Goltermann ANT-20E analizators. Šāda tipa mērinstrumenti ļauj ģenerēt un analizēt trafiku, apskatīt PDH un SDH freimu struktūru un saturu, mērīt zudumus, dispersiju un signāla aizkavi pārraides līnijā. Analizatora pieslēgšanas shēma ir redzama 6.6. attēlā.



**6.6. att. PDH/SDH analizatora pieslēgšanas shēma**

Audiosignālu cauriešanas analīzei tīkla struktūrā tika izmainīta (6.7. att.).



**6.7. att. Tīkla struktūra audiosignālu cauriešanas analīzei**

Audiosignāla uztveršanai tika izmantots VoIP SIP programmatēlrunis Zoiper, saistītais ar personālā datora audioieeju. Šajā pašā datorā ir uzstādīta Adobe Audition 2.0 programmatūra bals signāla spektrālas analīzes veikšanai. Kad analogais signāls no mikrofona tika padots uz PC1 audioieeju, īstenojās vairāki procesi: analogā signāla diskretizācija, kodēšana un kompresija, izmantojot G.711, ilbc, GSM, G.729 kodekus, un tā spektrāla analīze. Tālāk signāls tika pārraidīts uz PBX Asterisk caur STM-1 primāro tīklu un pēc komutācijas PBX serverī tika nosūtīts uz citu Zoiper VoIP programmatēlruni PC2 datorā. Pēc ciparu-analogu pārveidošanas, analogais izejas signāls tika padots uz telefona

klausuli un uz datora PC2 audioieeju, kur realizējās izejas balss signāla spektrālā analīze. Izejas balss signāla spektrs pēc trakta PC1-LAN1-STM1-LAN2-PC2 cauriešanas ir redzams 6.8. attēlā.



**6.8. att. Izejas balss signāla spektrs**

Izstrādātais heterogēnais tīkls (6.9. att.) tiek izmantots mācību procesā Rīgas Tehniskās universitātes Transporta institūtā. “Dzelzceļa sakaru sistēmas” disciplīnas praktisko nodarbību

ietvēros studentiem ir iespēja iegūt iemaņas datoru tīklu veidošanā un paplašināt savas zināšanas par datu pārraides procesu organizāciju tajos.



**6.9. att. Heterogēnais telekomunikāciju tīkls Transporta institūtā laboratorijā**

## SECINĀJUMI

Kabeļu sakaru līniju izmantošana, neskatoties uz bezvadu datu pārraides tehnoloģiju izplatīšanos, paliek nemaināmi aktuāla. Vītā pāra kabeļus var atrast visur — tie tiek izmantoti mūsdienu datoru tīklos, analogā un ciparu telefonijā, signalizācijas sistēmās. Šķiedru optikas kabeļus izmanto maģistrālajās līnijās, taču pēdējā laikā ir ievērojama tendence pielietot optiskās tehnoloģijas arī abonenta pusē.

Sakarā ar kabeļu līniju izplatību, pastāv nepieciešamība pēc sakaru tīklu projektēšanas instrumentiem. Kabeļu līniju parametru noteikšana ir viens no svarīgākiem projektēšanas etapiem.

Saskaņā ar noteiktajiem uzdevumiem, darba izpildes gaitā ir panākti šādi rezultāti:

1. Tika izskatīti kabeļu līniju matemātiskie modeļi un algoritmi, kas ļauj realizēt simetrisko, koaksiālo, optisko šķiedru sakaru līniju primāro un sekundāro parametru inženieraprēķinu metodes.
2. Paveiktasimetrisko un koaksiālo līniju matemātisko modeļu primāro un sekundāro parametru frekvenču dispersijas skaitliskā analīze, saņemta informācija par šo parametru izmaiņām atkarībā no frekvences un noteikta nogriešanas frekvence.
3. Veikta vienmodu optisko līniju hromatiskās dispersijas cēloņu analīze.
4. Apskatīts šķiedru optikas sakaru līnijas maksimālā garuma noteikšanas uzdevums, dots reģenerācijas iecirkņa skaitliskā aprēķina piemērs.
5. Sagatavoti simetrisko, koaksiālo un optisko sakaru līniju parametru skaitliskie aprēķinu piemēri Mathcad programmā.
6. Veikta simetrisko, koaksiālo un šķiedru optikas līniju skaitliski aprēķināto un standarta parametru salīdzinošā analīze. Analīze liecina, ka ar inženieraprēķinu palīdzību noteiktas sakaru līniju parametru vērtības nepārsniedz vairāk kā 5% no simetriskā vai koaksiālā un 15% no optiskā kabeļa standarta lielumiem.
7. Realizēta mūsdienu heterogēnā tīkla projektēšana un modelēšana, veikta tīkla eksperimentālā izpēte. Tīkls sevī apvieno simetriskās, koaksiālās, šķiedru

optikas sakaru līnijas un modernās telekomunikāciju tehnoloģijas. Izstrādātais tīkls ir palaists darbā Rīgas Tehniskās universitātes Transporta institūtā.

8. Izstrādātais eksperimentālais heterogēnais tīkls ļauj īstenot šādas funkcijas: realizēt telefonu sakarus, izmantojot VoIP risinājumu, pārraidīt datus caur SDH tīklu, pārskatāmi parādīt multipleksēšanas procesus SDH tīkla ietvēros, dot Transporta institūta studentiem zināšanas un iemaņas heterogēnā datu pārraides tīkla projektēšanā, uzstādīšanā un apkalpošanā.

Darba autors piedalījās Rīgas Tehniskās universitātes 55. starptautiskajā zinātniskajā konferencē ar referātu Popovs V., Skudnovs V., Vesiljevs A. "Mūsdienu heterogēna datu tīkla modelēšana", kurā tika apskatīts darbā aprakstītā heterogēnā tīkla konfigurācijas variants.

## LITERATŪRA

1. Bryant R., Madsen L. & Van Meggelen J., *Asterisk: The Definitive Guide*. United States of America: O'Reilly Media, 2013, 846 p.
2. Golden P., Dedieu H. & Jacobsen K.S., *Implementation and Applications of DSL Technology*. United States of America: CRC Press, 2007, 816 p.
3. Golovins J., *Sakaru kabeļa līniju parametru izpēte un skaitliska analīze*. Maģistra darbs. Rīga: RTU, DzTI, 2004, 77 lpp.
4. Popovs V., *Transporta sakaru līnijas: Kabeļu sakaru līniju parametru aprēķinu pamati*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2008, 114 lpp.
5. Popovs V., *Transporta sakaru līnijas*. Lekciju konspekts. Rīga: RTU, DzTI, 2005, 209 lpp.
6. Popovs V., *Transporta sakaru līnijas*. Laboratorijas praktikums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2007, 53 lpp.
7. Popovs V., Skudnovs V. & Vasiljevs A., "Simulation of Modern Heterogeneous Data Network," in *Proceedings of the 55. International Scientific conference of the Riga Technical University*, 2014
8. Senior J.M. & Jamro M.Y., *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Harlow, United Kingdom: Pearson Education, 2009, 1127 p.
9. Ziemelis J., *Elektrodinamikas pamati*. Rīga: RPI, 2001, 200 lpp.
10. Vasiljevs A. MATEMĀTISKIE MODEĻI UN ALGORITMI KABEĻU SAKARU LĪNIJU AUTOMATIZĒTĀJA PROJEKTĒŠANĀ. Bakalaura darbs. Rīga: RTU, 2015, 62 lpp.



**PIELIKUMI**

## SKSL parametru automatizētā aprēķina piemērs

### Dots:

$d := 0.6$	mm	vada dzīslas diametrs
$\delta := 0.26$	mm	vada izolācijas biezums (fāzes izolācija)
$\Delta := C$	mm	vada joslizolācija
$h := 6\xi$	mm	savijuma solis
$k_{st} := C$		savijuma tips: 0 — pāra 1 — dubulpāra 2 — zvaigžņu 3 — dubultzvaigžņu
$\sigma := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	vadu elektrovadītspēja
$\rho := 0.017$	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	vadu īpatnēja pretestība
$\epsilon_r := 1.3\xi$		izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība
$tg\delta_t := (3 \ 8 \ 12 \ 20)^T \cdot 10^{-4}$		izolācijas zuduma leņķa tangensa vērtības uzdotajās frekvencēs $f_{tg\delta}$
$f_{tg\delta} := (10 \ 100 \ 250 \ 500)^T \cdot 10^3$	Hz	
$f := (1 \ 10 \ 50 \ 100 \ 250)^T \cdot 10^3$	Hz	

### Fiziskie parametri:

$\rho_v := 0.017\xi$	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	vada īpatnēja pretestība
$\rho_a := 0.029\xi$	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$	alumīnija īpatnēja pretestība
$\sigma_v := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	vada elektrovadītspēja
$\sigma_a := 37 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	alumīnija elektrovadītspēja
$\mu_r := 1$		relatīvā magnētiskā caurlaidība
$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$	magnētiskā konstante
$c := 3 \cdot 10^5$	$km \cdot s^{-1}$	gaismas ātrums
$\epsilon_0 := \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2}$	$\frac{F}{m}$	elektriskā konstante
$\mu := \mu_0 \cdot \mu_r$		absolūtā magnētiskā caurlaidība
$\epsilon := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$		absolūtā dielektriskā caurlaidība
$f_g := f_0, f_0 + 2f_0 \cdot f_{length(f)-1}$	Hz	$n := 0..length(f) - 1$

**Izolētas dzīslas diametrs:**

$$d_1 := d + 2 \cdot \delta + 2\Delta = 1.17 \quad \text{mn}$$

**Attālums starp diviem vadiem:**

$$a := \begin{cases} d_1 & \text{if } k_{st} = 0 \vee k_{st} = 1 \\ 1.4d_1 & \text{if } k_{st} = 2 \vee k_{st} = 3 \end{cases}$$

$$a = 1.17 \quad \text{mn}$$

**Grupas diametrs:**

$$D := \begin{cases} 1.7d_1 & \text{if } k_{st} = 0 \\ 2.7d_1 & \text{if } k_{st} = 1 \\ 2.4d_1 & \text{if } k_{st} = 2 \\ 3.9d_1 & \text{if } k_{st} = 3 \end{cases}$$

$$D = 2.001 \quad \text{mn}$$

**Kabeļa savijuma koeficients:**

$$\chi := \sqrt{1 + \pi^2 \left( \frac{d + d_1}{h} \right)^2} = 1.004$$

**Cilindriskās funkcijas:**

$v_x :=$	$v_F :=$	$v_G :=$	$v_H :=$	$v_Q :=$
$\begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 1.5 \\ 2.0 \\ 2.5 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 4.0 \\ 4.5 \\ 5.0 \\ 7.0 \\ 10 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.000326 \\ 0.00519 \\ 0.0258 \\ 0.0782 \\ 0.1756 \\ 0.318 \\ 0.492 \\ 0.678 \\ 0.862 \\ 1.042 \\ 1.743 \\ 2.799 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.000975 \\ 0.01519 \\ 0.0691 \\ 0.1724 \\ 0.295 \\ 0.405 \\ 0.499 \\ 0.584 \\ 0.669 \\ 0.755 \\ 1.109 \\ 1.641 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0417 \\ 0.042 \\ 0.053 \\ 0.092 \\ 0.169 \\ 0.263 \\ 0.348 \\ 0.416 \\ 0.466 \\ 0.503 \\ 0.530 \\ 0.596 \\ 0.643 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0.9998 \\ 0.997 \\ 0.987 \\ 0.961 \\ 0.913 \\ 0.845 \\ 0.766 \\ 0.686 \\ 0.616 \\ 0.556 \\ 0.400 \\ 0.286 \end{pmatrix}$

$$F(x) := \begin{cases} \text{return } 0.25(\sqrt{2} \cdot x - 3) & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(cspline(v_x, v_F), v_x, v_F, x) & \end{cases}$$

raksturo pretestības palielināšanos  
virsmas efekta dēļ

$$G(x) := \begin{cases} \text{return } 0.125(\sqrt{2} \cdot x - 1) & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(\text{cspline}(v_x, v_G), v_x, v_G, x) \end{cases}$$

raksturo pretestības palielināšanos  
kaimiņvadu tuvuma dēļ

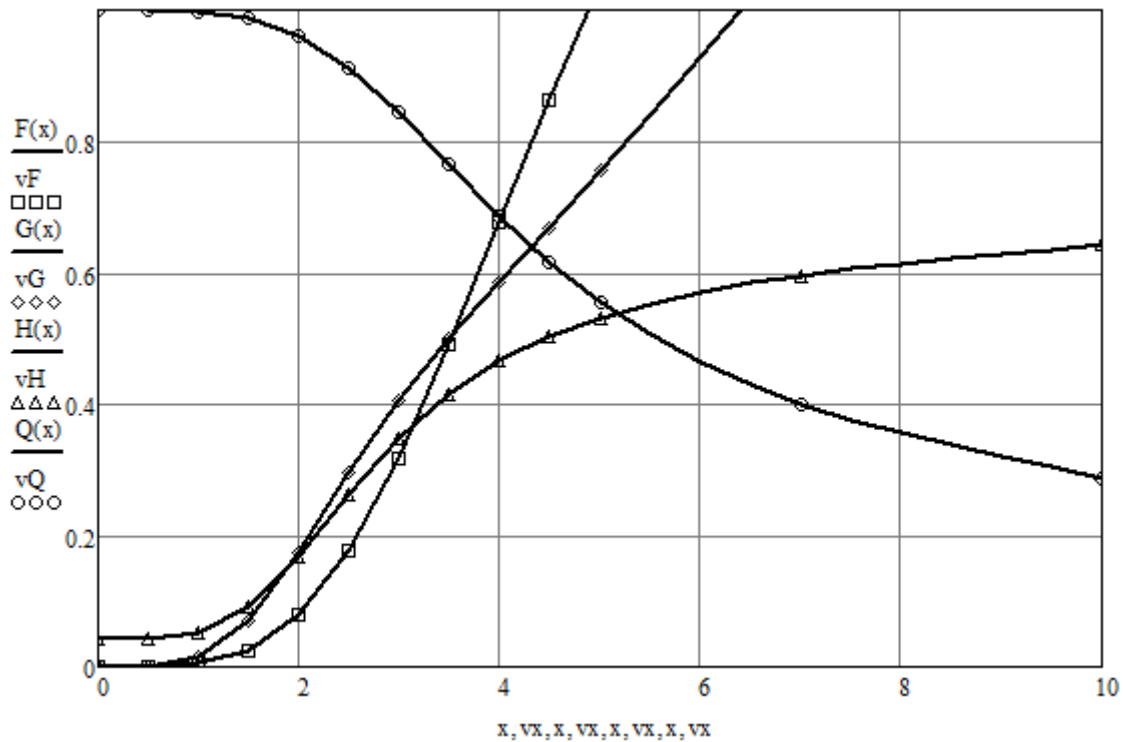
$$H(x) := \begin{cases} \text{return } 0.750 & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(\text{cspline}(v_x, v_H), v_x, v_H, x) \end{cases}$$

raksturo pretestības palielināšanos kaimiņ  
vadu tuvuma dēļ

$$Q(x) := \begin{cases} \text{return } 2\sqrt{2} \cdot x^{-1} & \text{if } x > 10 \\ \text{interp}(\text{cspline}(v_x, v_Q), v_x, v_Q, x) \end{cases}$$

raksturo pretestības pazemināšanos  
virsmas efekta dēļ

$x := 0, 0.5, 10$



### Aktīvā garuma pretestība:

$$R_0 := \frac{2550 \rho \cdot \chi}{d^2} = 109.364 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

garuma pretestība līdzstrāvai

$$x(f) := 0.0005d \cdot \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}$$

$$P_S := \begin{cases} 1 & \text{if } k_{st} = 0 \\ 2 & \text{if } k_{st} = 1 \\ 5 & \text{if } k_{st} = 2 \\ 3 & \text{if } k_{st} = 3 \end{cases}$$

koeficients, kas raksturo zudumus  
kaimiņvadu tuvuma efekta dēļ

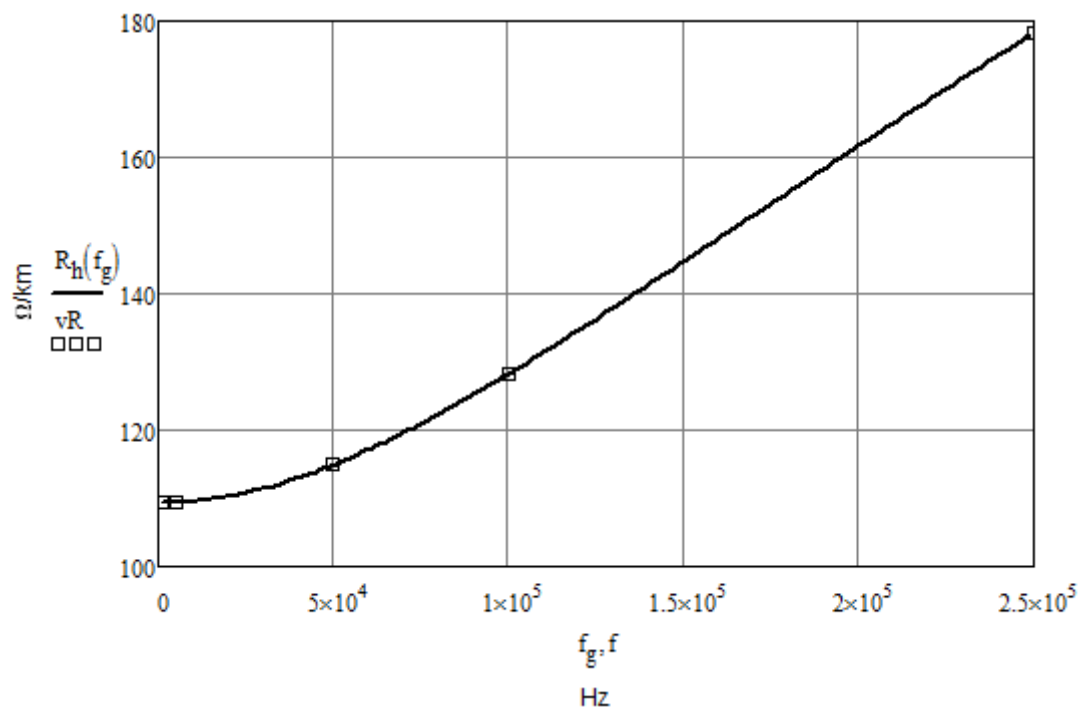
$$P_S = 1$$

$$R_h(f) := R_0 \left[ 1 + F(x(f)) + \frac{P_S \cdot G(x(f)) \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 - H(x(f)) \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2} \right] \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$vR := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow R_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \text{Hz} \quad vR_n = \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$1 \cdot 10^3$	109.408
$5 \cdot 10^3$	109.426
$50 \cdot 10^3$	114.924
$100 \cdot 10^3$	128.272
$250 \cdot 10^3$	178.23

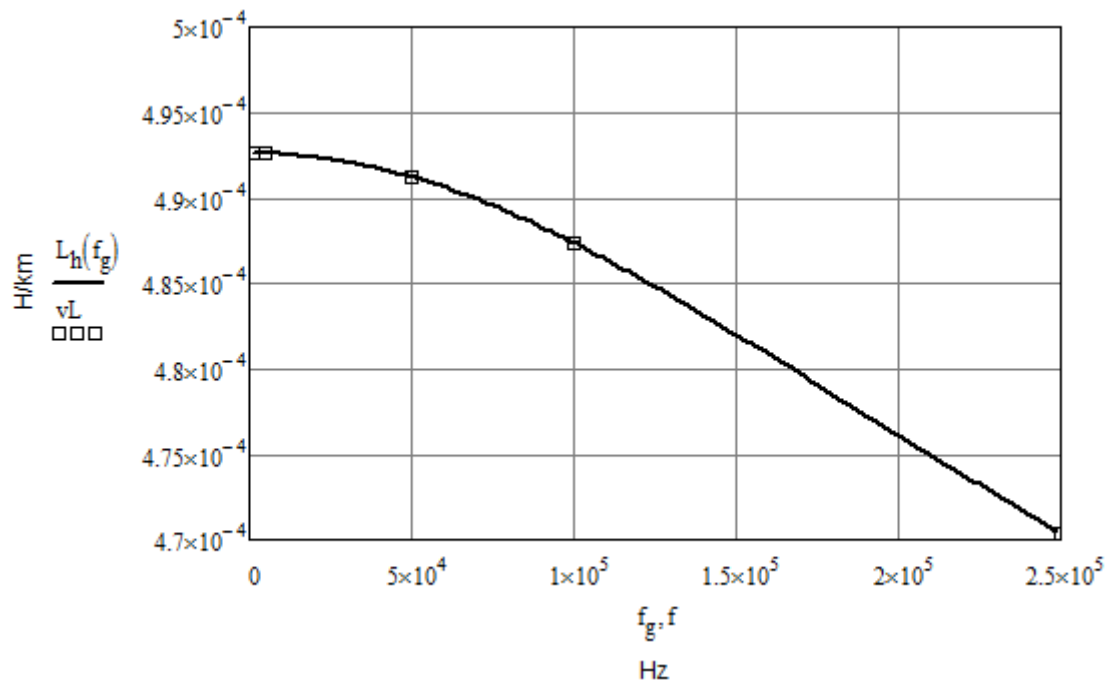


**Garuma induktivitāte:**

$$L_h(f) := \chi \cdot \left( 4 \cdot \ln\left(\frac{2a-d}{d}\right) + Q(x(f)) \cdot \mu_r \right) \cdot 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}}$$

$$vL := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow L_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$vL_n =$	$\frac{\text{H}}{\text{km}}$
$1 \cdot 10^3$		$492.642 \cdot 10^{-6}$	
$5 \cdot 10^3$		$492.623 \cdot 10^{-6}$	
$50 \cdot 10^3$		$491.228 \cdot 10^{-6}$	
$100 \cdot 10^3$		$487.382 \cdot 10^{-6}$	
$250 \cdot 10^3$		$470.392 \cdot 10^{-6}$	



**Labojuma koeficients savijumam:**

$$\psi := \begin{cases} \frac{(D + d_1 - d)^2 - a^2}{(D + d_1 - d)^2 + a^2} & \text{if } k_{st} = 0 \vee k_{st} = 2 \\ \frac{(0.65D + d_1 - d)^2 - a^2}{(0.65D + d_1 - d)^2 + a^2} & \text{if } k_{st} = 1 \\ \frac{(0.43D + d_1 - d)^2 - a^2}{(0.43D + d_1 - d)^2 + a^2} & \text{if } k_{st} = 3 \end{cases}$$

$$\psi = 0.648$$

**Garuma kapacitāte:**

$$C_h := \frac{\chi \cdot \epsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln\left(\frac{2a}{d}\right)} = 44.627 \times 10^{-9} \frac{F}{km}$$

**Izolācijas zuduma leņķa tangenss:**

$$\text{tg}\delta(f) := \begin{cases} \text{tg}\delta_{t_0} & \text{if } f \leq f_{\text{tg}\delta_0} \\ \text{linterp}(f_{\text{tg}\delta_0}, \text{tg}\delta_t, f) & \text{if } (f_{\text{tg}\delta_0} \leq f \leq f_{\text{tg}\delta_0} \cdot \text{length}(f_{\text{tg}\delta}) - 1) \\ \text{tg}\delta_{t \cdot \text{length}(f_{\text{tg}\delta}) - 1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Izolācijas garuma vadītspēja:**

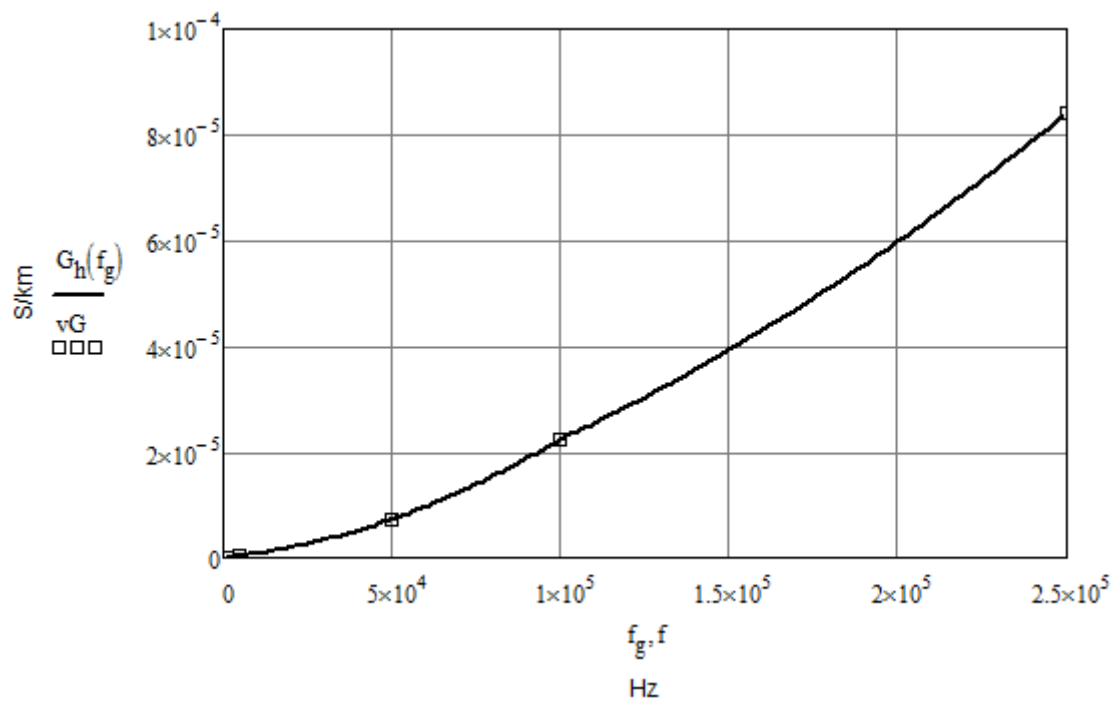
$$G_h(f) := 2\pi \cdot f \cdot C_h \cdot \text{tg}\delta(f) \cdot S \cdot \text{km}^{-1}$$

$$vG := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow G_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \quad \text{Hz} \quad vG_n = \quad \frac{S}{km}$$

1 · 10 <sup>3</sup>
5 · 10 <sup>3</sup>
50 · 10 <sup>3</sup>
100 · 10 <sup>3</sup>
250 · 10 <sup>3</sup>

84.119 · 10 <sup>-9</sup>
420.596 · 10 <sup>-9</sup>
7.321 · 10 <sup>-6</sup>
22.432 · 10 <sup>-6</sup>
84.119 · 10 <sup>-6</sup>



**Vilņu pretestība:**

$$Z_v := \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{2a - d}{d}\right) = 99.793 \Omega$$

**Garuma rimšanas koeficients:**

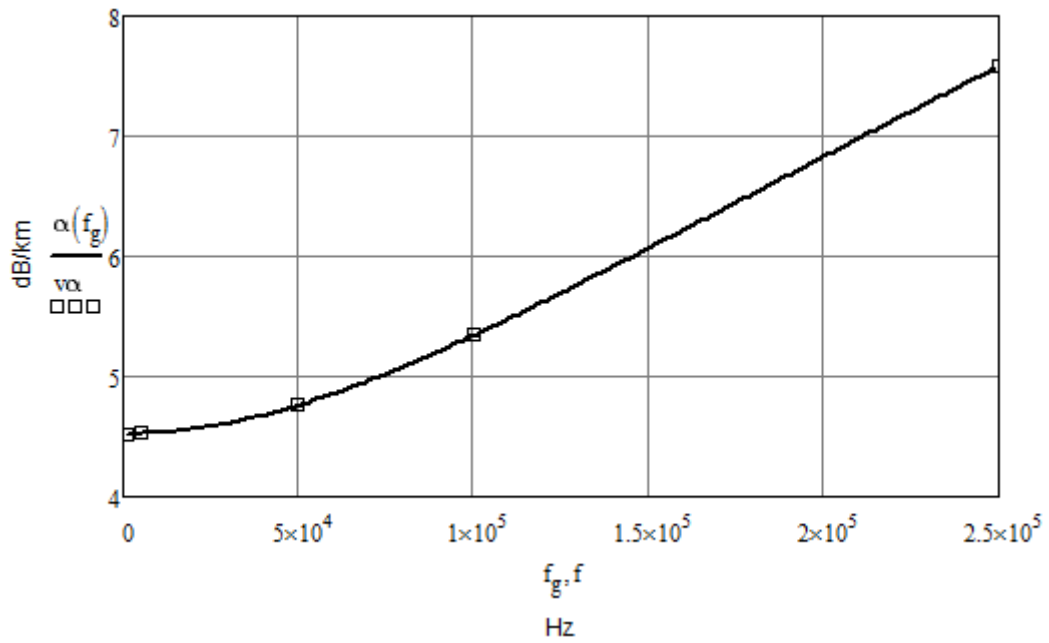
$$\alpha(f) := 8.69 \left( \frac{R_h(f)}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_h}{L_h(f)}} + \frac{G_h(f)}{2} \sqrt{\frac{L_h(f)}{C_h}} \right) \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

$$v\alpha := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \alpha(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$  Hz       $v\alpha_n =$   $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$

1 · 10 <sup>3</sup>
5 · 10 <sup>3</sup>
50 · 10 <sup>3</sup>
100 · 10 <sup>3</sup>
250 · 10 <sup>3</sup>

4.525
4.526
4.763
5.343
7.58

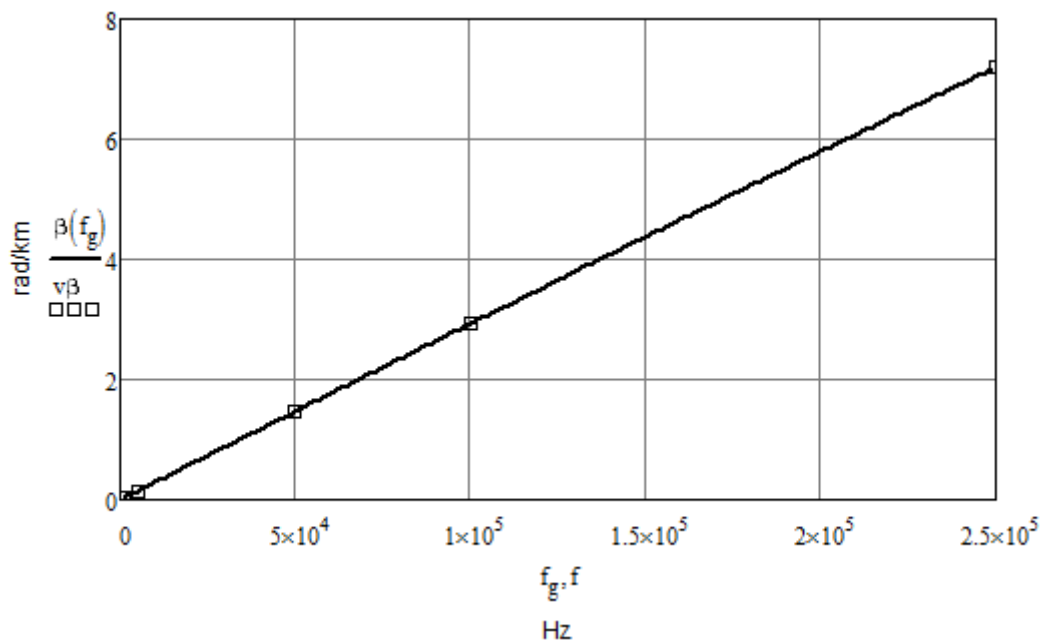


**Fāzes koeficients:**

$$\beta(f) := 2\pi f \cdot \sqrt{L_h(f) \cdot C_h}$$

$$v\beta := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \beta(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$v\beta_n =$	$\frac{\text{rad}}{\text{km}}$
$1 \cdot 10^3$		0.029	
$5 \cdot 10^3$		0.147	
$50 \cdot 10^3$		1.471	
$100 \cdot 10^3$		2.93	
$250 \cdot 10^3$		7.197	

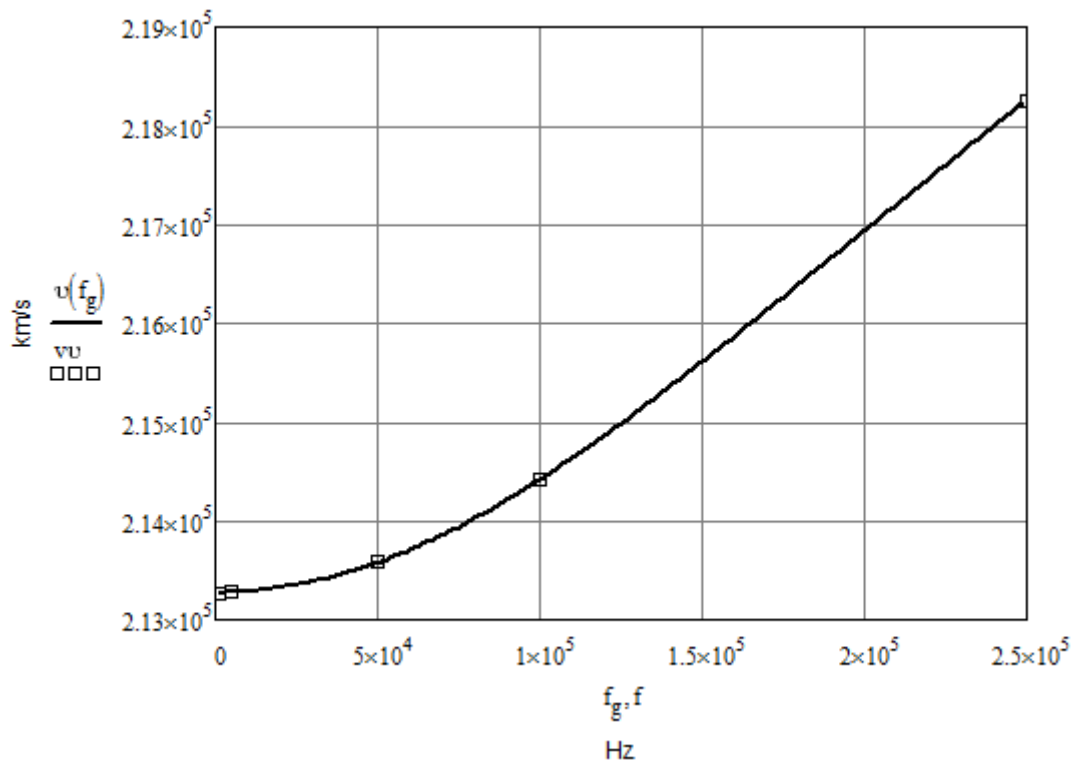


**Izplatīšanās ātrums:**

$$v(f) := \frac{1}{\sqrt{L_h(f) \cdot C_h}} \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$v \mathbf{v} := \begin{cases} \text{für } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow v(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$v \mathbf{v}_n =$	$\frac{\text{km}}{\text{s}}$
1 · 10 <sup>3</sup>		213274	
5 · 10 <sup>3</sup>		213278	
50 · 10 <sup>3</sup>		213580	
100 · 10 <sup>3</sup>		214421	
250 · 10 <sup>3</sup>		218259	

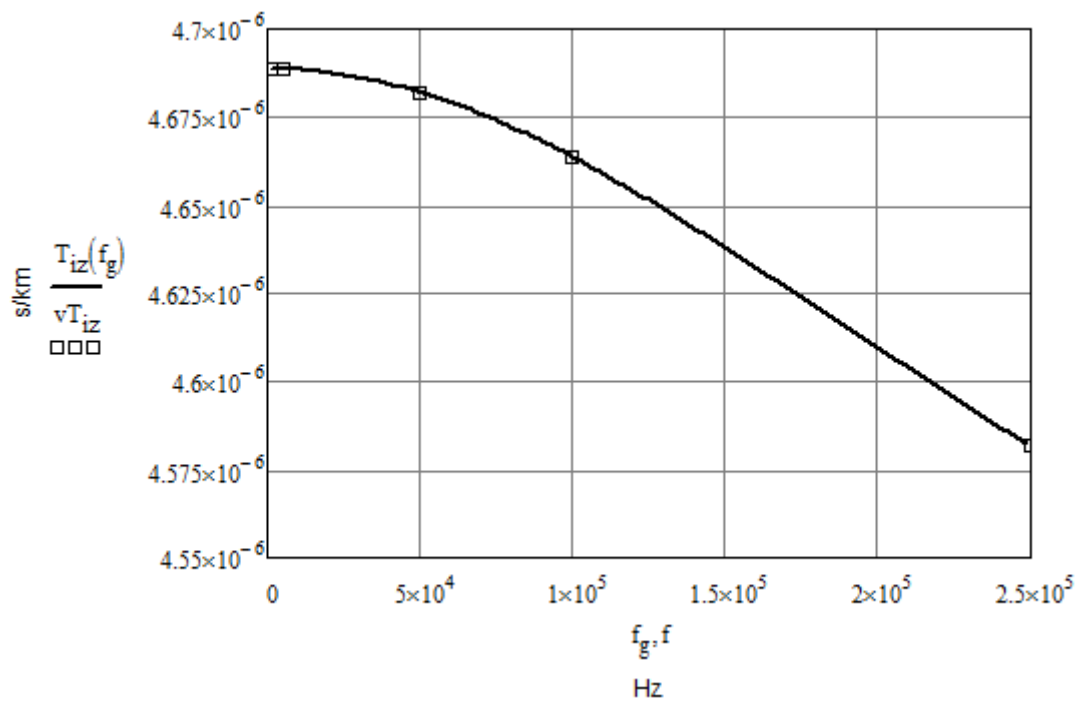


**Izplatīšanās laiks:**

$$T_{iz}(f) := \frac{1}{v(f)} \frac{s}{km}$$

$$vT_{iz} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow T_{iz}(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$vT_{iz_n} =$	$\frac{s}{km}$
1 · 10 <sup>3</sup>		4.689 · 10 <sup>-6</sup>	
5 · 10 <sup>3</sup>		4.689 · 10 <sup>-6</sup>	
50 · 10 <sup>3</sup>		4.682 · 10 <sup>-6</sup>	
100 · 10 <sup>3</sup>		4.664 · 10 <sup>-6</sup>	
250 · 10 <sup>3</sup>		4.582 · 10 <sup>-6</sup>	



**Saīsinājuma koeficients:**

$$K_s(f) := \frac{c}{v(f)}$$

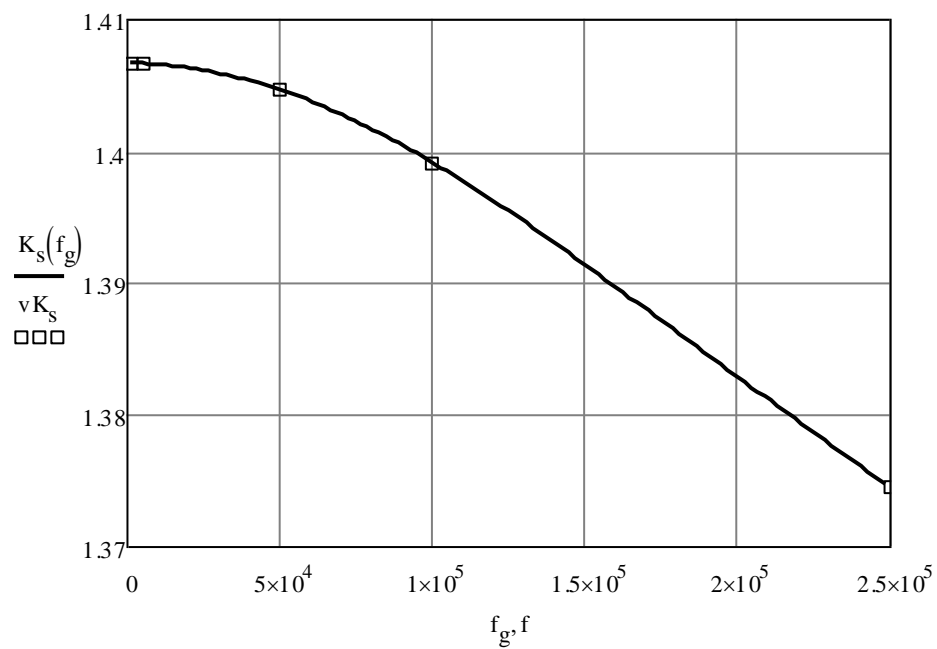
$$vK_s := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow K_s(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$                       Hz

1 · 10 <sup>3</sup>
5 · 10 <sup>3</sup>
50 · 10 <sup>3</sup>
100 · 10 <sup>3</sup>
250 · 10 <sup>3</sup>

$vK_{s_n} =$

1.407
1.407
1.405
1.399
1.375



**Līnijas darba rimšana:**

Līnijas garums — 0.5, 1, 2 km

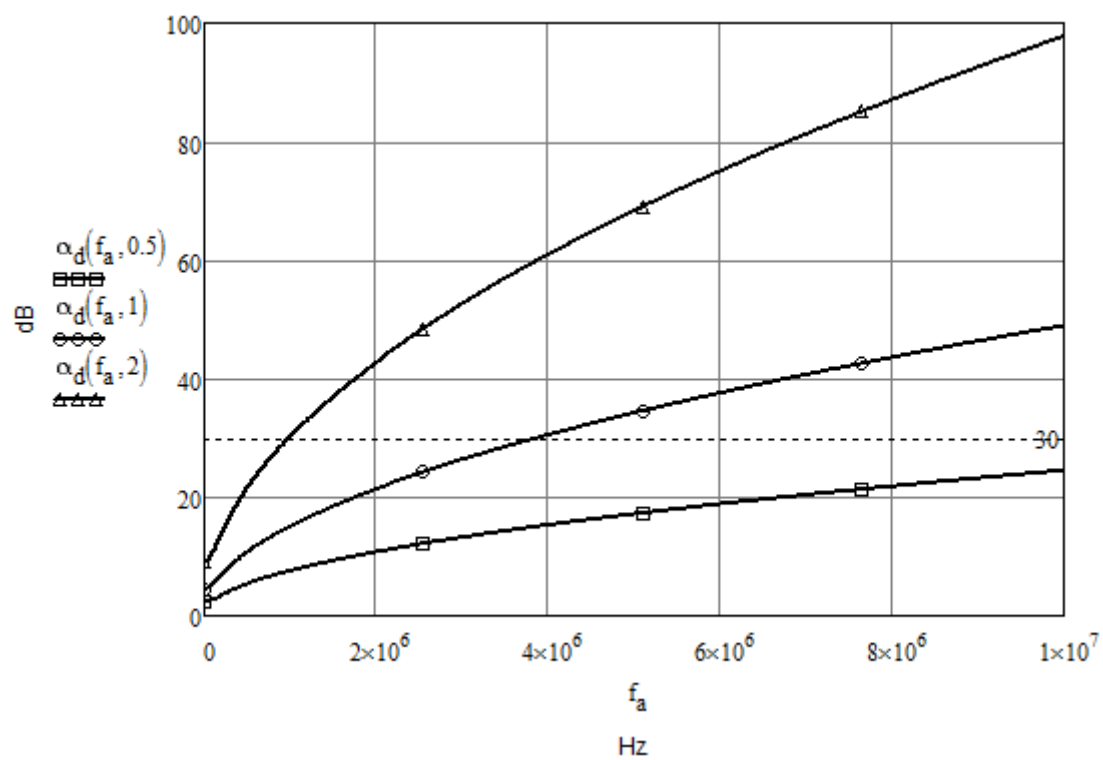
$$\Delta a_1 := 0 \text{ dB}$$

$$\Delta a_2 := 0 \text{ dB}$$

$$\Delta a_3 := 0 \text{ dB}$$

$$\alpha_d(f, L) := \alpha(f) \cdot L + \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 \text{ dB}$$

$$f_a := f_0, f_0 + 10f_0 \dots 10 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$



## KKSL parametru automatizētā aprēķina piemērs

### Dots:

$d := 3.3$	mm	iekšējā vadītāja diametrs
$D := 14.9$	mm	ārējā vadītāja diametrs
$\sigma_{ie} := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	iekšējā vadītāja elektrovadītspēja
$\sigma_{ar} := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	ārējā vadītāja elektrovadītspēja
$\epsilon_r := 1.41$		PEEG izolācijas relatīvā dielektriskā caurlaidība
$tg\delta_t := (0.9 \ 1.18)^T \cdot 10^{-4}$		izolācijas zuduma leņķa tangensa vērtības uzdotajās frekvencēs $f_{tg\delta}$
$f_{tg\delta} := (10^6 \ 10^9)^T$	Hz	
$f := (5 \ 50 \ 100 \ 200 \ 400 \ 600)^T \cdot 10^6$	Hz	darba frekvenču diapazons

### Fiziskie parametri:

$\sigma_v := 58 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	vara elektrovadītspēja
$\sigma_a := 37 \cdot 10^6$	$S \cdot m^{-1}$	alumīnija elektrovadītspēja
$\mu_r := 1$		relatīvā magnētiskā caurlaidība
$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$	magnētiskā konstante
$c := 3 \cdot 10^8$	$m \cdot s^{-1}$	gaismas ātrums
$\epsilon_0 := \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2}$	$\frac{F}{m}$	elektriskā konstante
$\mu := \mu_0 \cdot \mu_r$		absolūtā magnētiskā caurlaidība
$\epsilon := \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$		absolūtā dielektriskā caurlaidība
$f_g := f_0, f_0 + 2f_0 \dots f_{length(f)-1}$		$n := 0..length(f) - 1$

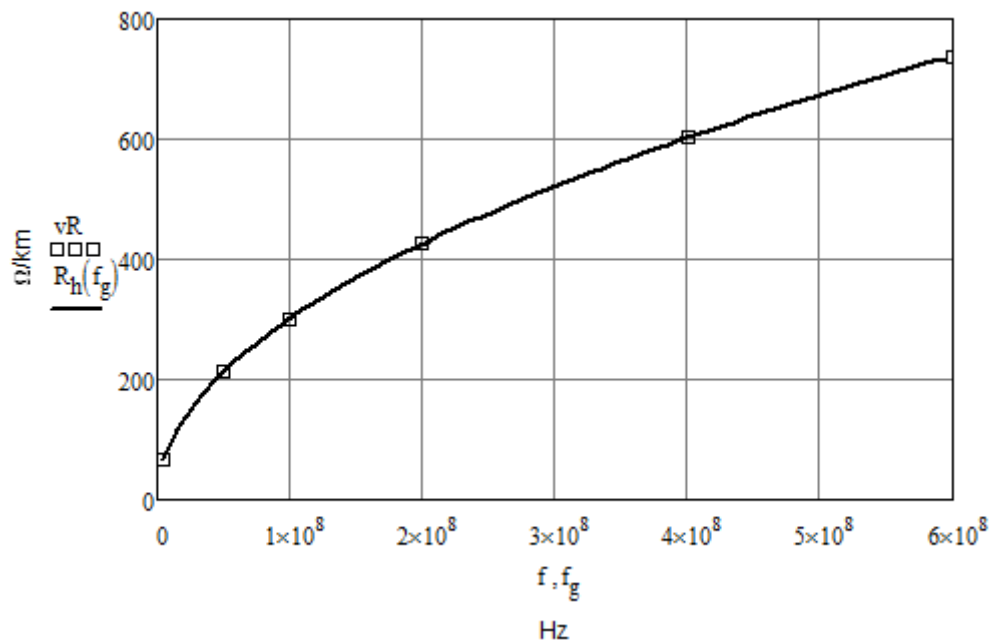
**Aktīvā garuma pretestība:**

$$R_h(f) := 6.32\sqrt{f} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ie} \cdot d}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ar} \cdot D}} \right) \cdot 10^2 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$vR := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow R_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$$f_n = \quad \text{Hz} \quad \quad vR_n = \quad \frac{\Omega}{\text{km}}$$

5 · 10 <sup>6</sup>	67.354
50 · 10 <sup>6</sup>	212.991
100 · 10 <sup>6</sup>	301.215
200 · 10 <sup>6</sup>	425.982
400 · 10 <sup>6</sup>	602.43
600 · 10 <sup>6</sup>	737.823

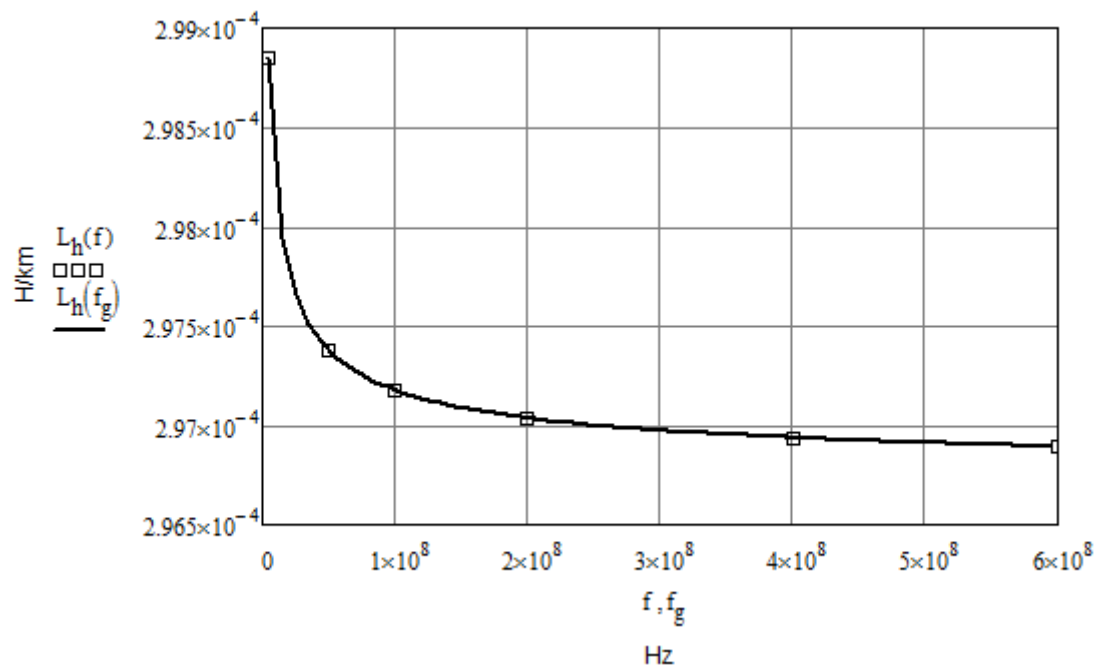


**Garuma induktivitāte:**

$$L_h(f) := \frac{101}{\sqrt{f}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ie} \cdot d}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ar} \cdot D}} \right) + 2\ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}}$$

$$vL := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow L_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$vL_n =$	$\frac{H}{\text{km}}$
$5 \cdot 10^6$		$298.85 \cdot 10^{-6}$	
$50 \cdot 10^6$		$297.378 \cdot 10^{-6}$	
$100 \cdot 10^6$		$297.178 \cdot 10^{-6}$	
$200 \cdot 10^6$		$297.037 \cdot 10^{-6}$	
$400 \cdot 10^6$		$296.938 \cdot 10^{-6}$	
$600 \cdot 10^6$		$296.894 \cdot 10^{-6}$	



**Garuma kapacitāte:**

$$C_h := \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln\left(\frac{D}{d}\right)} = 5.28 \times 10^{-8} \frac{\text{F}}{\text{km}}$$

**Izolācijas zuduma leņķa tangenss:**

$$\text{tg}\delta(f) := \begin{cases} \text{tg}\delta_{t_0} & \text{if } (f \leq f_{\text{tg}\delta_0}) \\ \text{linterp}(f_{\text{tg}\delta_0}, \text{tg}\delta_t, f) & \text{if } (f_{\text{tg}\delta_0} \leq f \leq f_{\text{tg}\delta_0} + \text{length}(f_{\text{tg}\delta}) - 1) \\ \text{tg}\delta_{\text{length}(f_{\text{tg}\delta}) - 1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

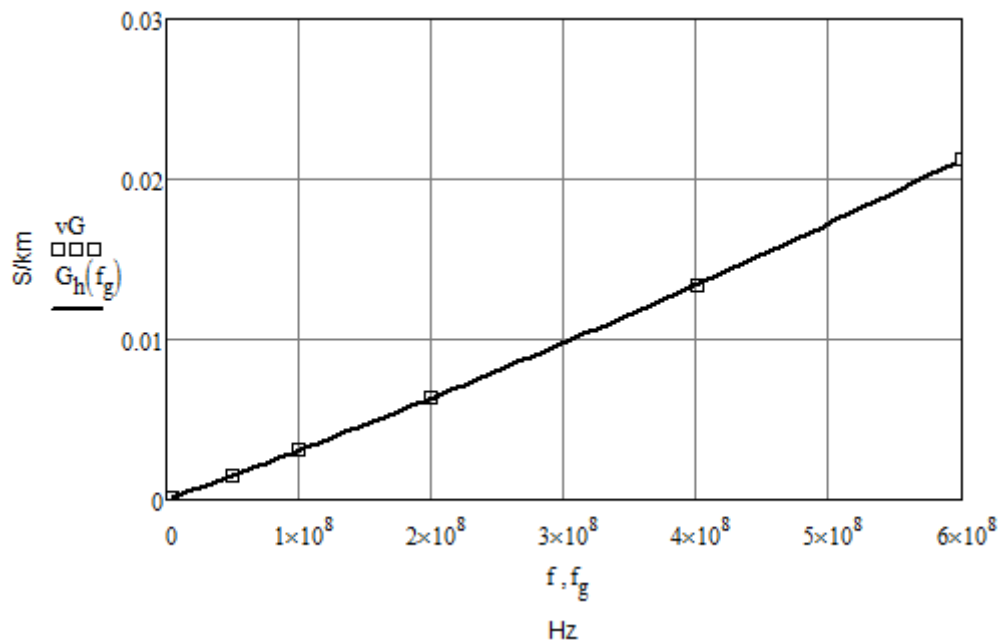
**Izolācijas garuma vadītspēja:**

$$G_h(f) := 2\pi \cdot f \cdot C_h \cdot \text{tg}\delta(f) \frac{S}{\text{km}}$$

$$vG := \begin{cases} \text{f\"or } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow G_h(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$             Hz             $vG_n =$              $\frac{S}{\text{km}}$

$5 \cdot 10^6$	$149.485 \cdot 10^{-6}$
$50 \cdot 10^6$	$1.516 \cdot 10^{-3}$
$100 \cdot 10^6$	$3.078 \cdot 10^{-3}$
$200 \cdot 10^6$	$6.342 \cdot 10^{-3}$
$400 \cdot 10^6$	$13.428 \cdot 10^{-3}$
$600 \cdot 10^6$	$21.258 \cdot 10^{-3}$



**Viļņu pretestība:**

$$Z_v := \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) = 74.959 \Omega$$

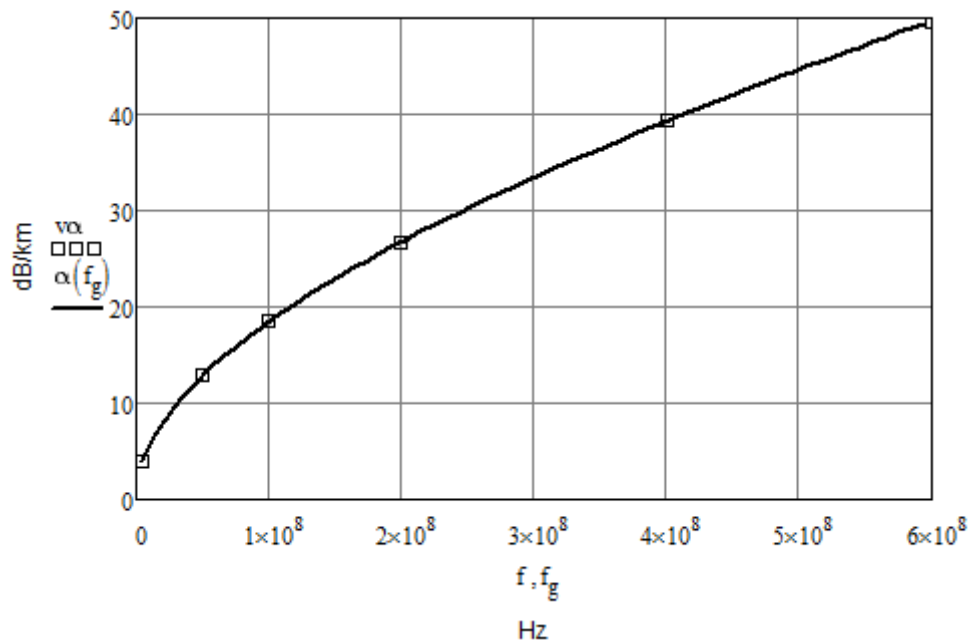
**Garuma rimšanas koeficients:**

$$\alpha(f) := 8.69 \left( \frac{R_h(f)}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_h}{L_h(f)}} + \frac{G_h(f)}{2} \sqrt{\frac{L_h(f)}{C_h}} \right) \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

$$v\alpha := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \alpha(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$                       Hz                       $v\alpha_n =$                        $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$

$5 \cdot 10^6$	3.939
$50 \cdot 10^6$	12.826
$100 \cdot 10^6$	18.449
$200 \cdot 10^6$	26.745
$400 \cdot 10^6$	39.281
$600 \cdot 10^6$	49.68



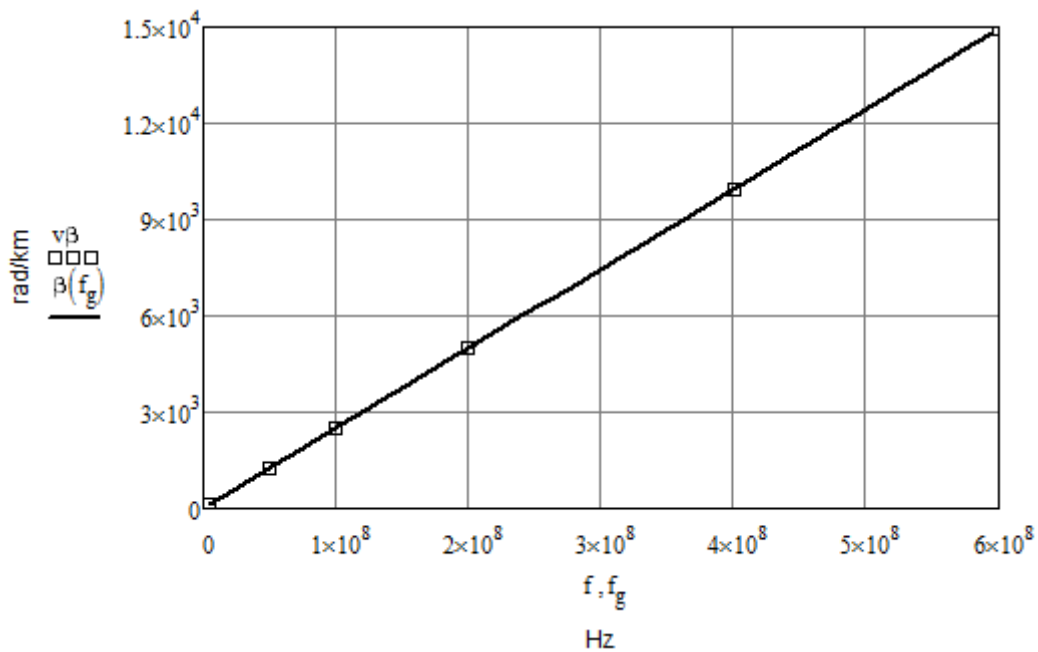
**Fāzes koeficients:**

$$\beta(f) := 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L_h(f)} \cdot C_h \frac{\text{rad}}{\text{km}}$$

$$v\beta := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \beta(f_i) \end{cases}$$

$f_n =$                       Hz                       $v\beta_n =$                        $\frac{\text{rad}}{\text{km}}$

$5 \cdot 10^6$	$124.798$
$50 \cdot 10^6$	$1.245 \cdot 10^3$
$100 \cdot 10^6$	$2.489 \cdot 10^3$
$200 \cdot 10^6$	$4.977 \cdot 10^3$
$400 \cdot 10^6$	$9.952 \cdot 10^3$
$600 \cdot 10^6$	$1.493 \cdot 10^4$



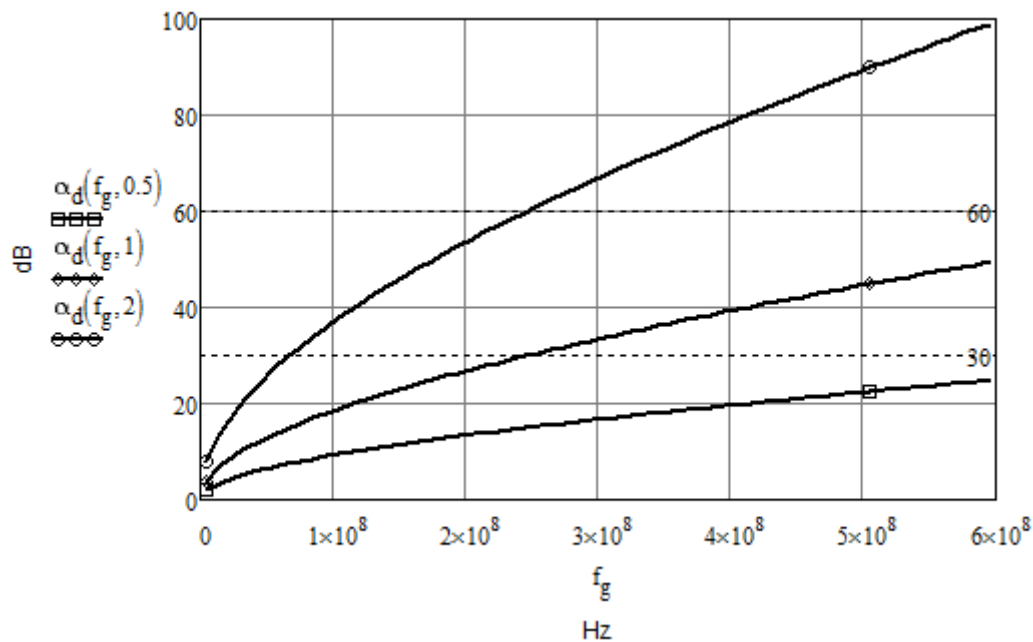
**Līnijas darba rimšana:**

Līnijas garums — 0.5, 1, 2 km.

$$a_d(f, L) := \alpha(f) \cdot L \text{ dB}$$

$$va_d(L) := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow \alpha(f_i) \cdot L \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$v\alpha_d(0.5) =$	dB	$v\alpha_d(1) =$	dB	$v\alpha_d(2) =$	dB
$5 \cdot 10^6$		1.969		3.939		7.878	
$50 \cdot 10^6$		6.413		12.826		25.652	
$100 \cdot 10^6$		9.225		18.449		36.898	
$200 \cdot 10^6$		13.372		26.745		53.489	
$400 \cdot 10^6$		19.64		39.281		78.562	
$600 \cdot 10^6$		24.84		49.68		99.359	

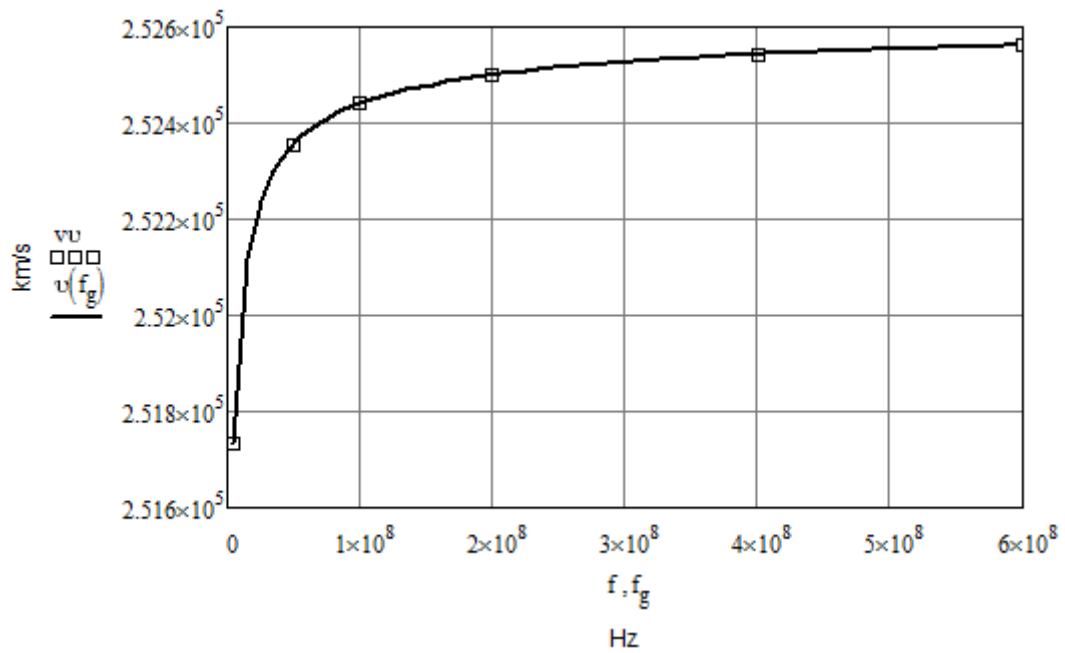


Izplatīšanās ātrums:

$$v(f) := \frac{1}{\sqrt{L_h(f) \cdot C_h}} \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$v := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow v(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$	Hz	$v v_n =$	$\frac{\text{km}}{\text{s}}$
$5 \cdot 10^6$		$251.734 \cdot 10^3$	
$50 \cdot 10^6$		$252.356 \cdot 10^3$	
$100 \cdot 10^6$		$252.441 \cdot 10^3$	
$200 \cdot 10^6$		$252.501 \cdot 10^3$	
$400 \cdot 10^6$		$252.543 \cdot 10^3$	
$600 \cdot 10^6$		$252.562 \cdot 10^3$	



**Saīsinājuma koeficients:**

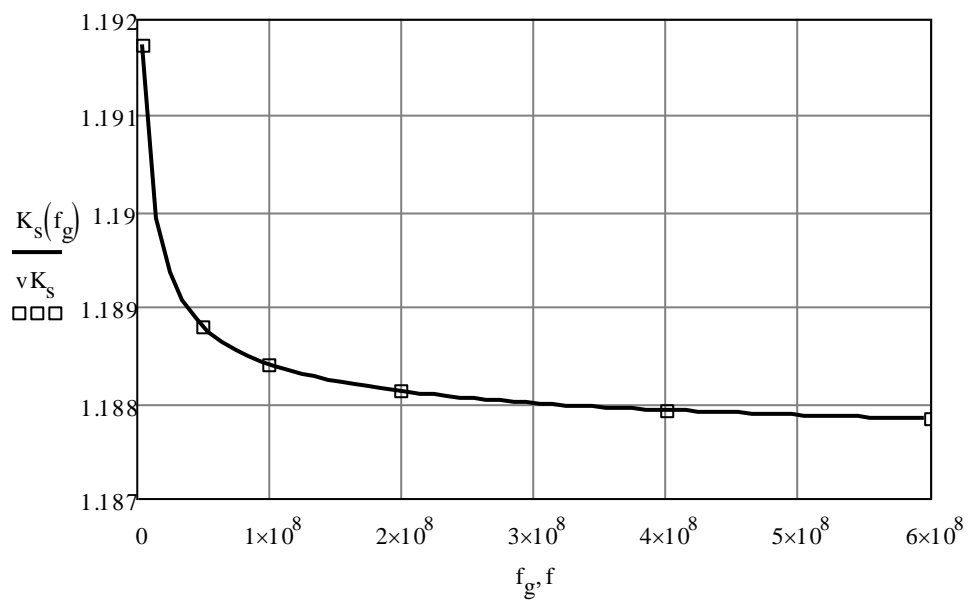
$$K_s(f) := \frac{c}{v(f)}$$

$$vK_s := \begin{cases} \text{for } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow K_s(f_i) \end{cases}$$

$f_n =$                       Hz                       $vK_{s_n} =$

5 · 10 <sup>6</sup>
50 · 10 <sup>6</sup>
100 · 10 <sup>6</sup>
200 · 10 <sup>6</sup>
400 · 10 <sup>6</sup>
600 · 10 <sup>6</sup>

1.192
1.189
1.188
1.188
1.188
1.188



**Izplatīšanās laiks:**

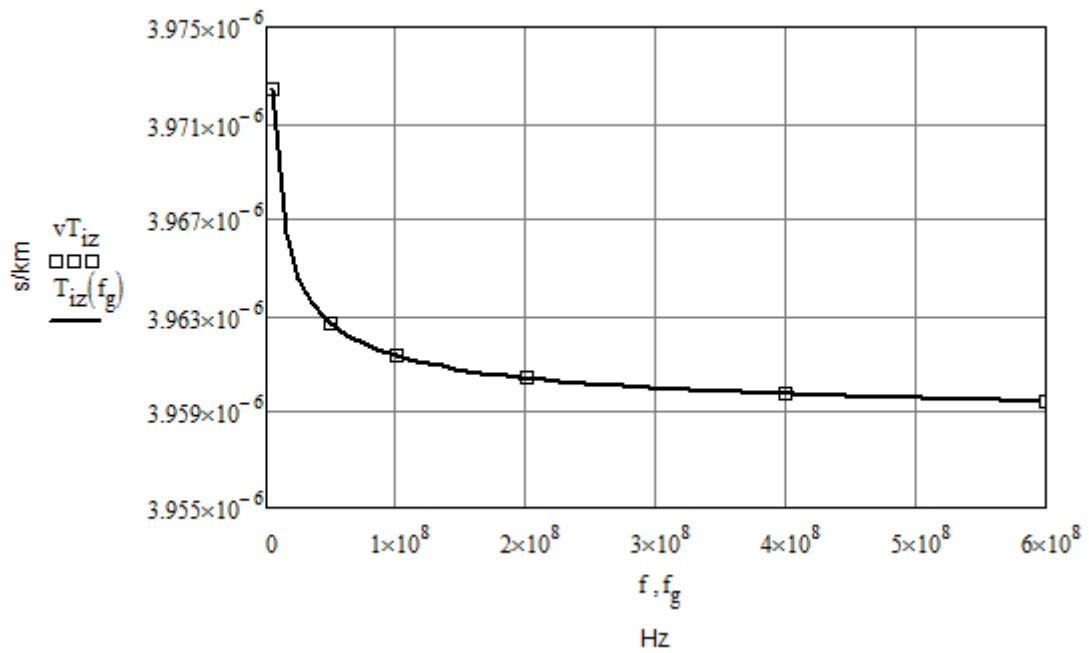
$$T_{iz}(f) := \frac{1}{v(f)} \frac{s}{km}$$

$$vT_{iz} := \begin{cases} \text{f\"or } i \in 0..(\text{length}(f) - 1) \\ v_i \leftarrow T_{iz}(f_i) \\ v \end{cases}$$

$f_n =$                       Hz                       $vT_{iz_n} =$                        $\frac{s}{km}$

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

$3.972 \cdot 10^{-6}$
$3.963 \cdot 10^{-6}$
$3.961 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.959 \cdot 10^{-6}$



**Aiztures laiks:**

$$T_{\text{aiz}}(f, L) := T_{\text{iz}}(f) \cdot Ls$$

$f_n =$                       Hz                       $T_{\text{aiz}}(f, 0.5)_n =$                       s                       $T_{\text{aiz}}(f, 1)_n =$                       s                       $T_{\text{aiz}}(f, 2)_n =$                       s

$5 \cdot 10^6$
$50 \cdot 10^6$
$100 \cdot 10^6$
$200 \cdot 10^6$
$400 \cdot 10^6$
$600 \cdot 10^6$

$1.986 \cdot 10^{-6}$
$1.981 \cdot 10^{-6}$
$1.981 \cdot 10^{-6}$
$1.98 \cdot 10^{-6}$
$1.98 \cdot 10^{-6}$
$1.98 \cdot 10^{-6}$

$3.972 \cdot 10^{-6}$
$3.963 \cdot 10^{-6}$
$3.961 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.96 \cdot 10^{-6}$
$3.959 \cdot 10^{-6}$

$7.945 \cdot 10^{-6}$
$7.925 \cdot 10^{-6}$
$7.923 \cdot 10^{-6}$
$7.921 \cdot 10^{-6}$
$7.919 \cdot 10^{-6}$
$7.919 \cdot 10^{-6}$

## ŠOSL parametru automatizētā aprēķina piemērs

### Dots:

$d := 8.3$	$\mu\text{m}$	serdeņa diametrs
$\lambda := 1.54$	$\mu\text{m}$	darba viļņa garums
$\Delta\lambda := 2$	$\text{nm}$	starojuma avota spektra platums
$n_1 := 1.467$		serdeņa laušanas koeficients
$\Delta := 0.001$		laušanas rādītāju relatīvā starpība
$\text{tg}\delta := 10 \cdot 10^{-12}$		viļņvada materiāla zuduma leņķa tangenss
$c := 3 \cdot 10^8$	$\text{km s}^{-1}$	gaismas ātrums vakuumā
$L := (10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 100)^T$	$\text{km}$	līnijas garums
$L_g := 1, 2, \dots, L_{\text{length}(L)-1}$	$\text{km}$	

### Apvalka laušanas koeficients:

$$n_2 := n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta} = 1.463$$

### Skaitliskā apertūra:

$$\text{NA} := n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} = 0.114$$

### Raksturojošā frekvence:

$$V := \frac{\pi \cdot d \cdot \text{NA}}{\lambda} = 1.912$$

### Kritiskā viļņa garums:

$$\lambda_{\text{kr}} := \frac{\pi \cdot d \cdot \text{NA}}{2.405} = 1.232 \quad \mu\text{m}$$

### Kritiskā frekvence:

$$f_{\text{kr}} := \frac{c}{n_1 \cdot \lambda_{\text{kr}}} \cdot 10^3 = 1.66 \times 10^8 \quad \text{MHz}$$

### Fāžu ātrums:

$$V_{\phi} := \frac{c}{n_1} \cdot 10^3 = 2.045 \times 10^8 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



### Energijas zudumi uz apslāpēšanu:

$$\alpha_a := \frac{\pi n_1 \cdot \text{tg} \delta}{\lambda} \cdot 8.69 \cdot 10^8 = 0.026 \quad \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

### Releja zudumi:

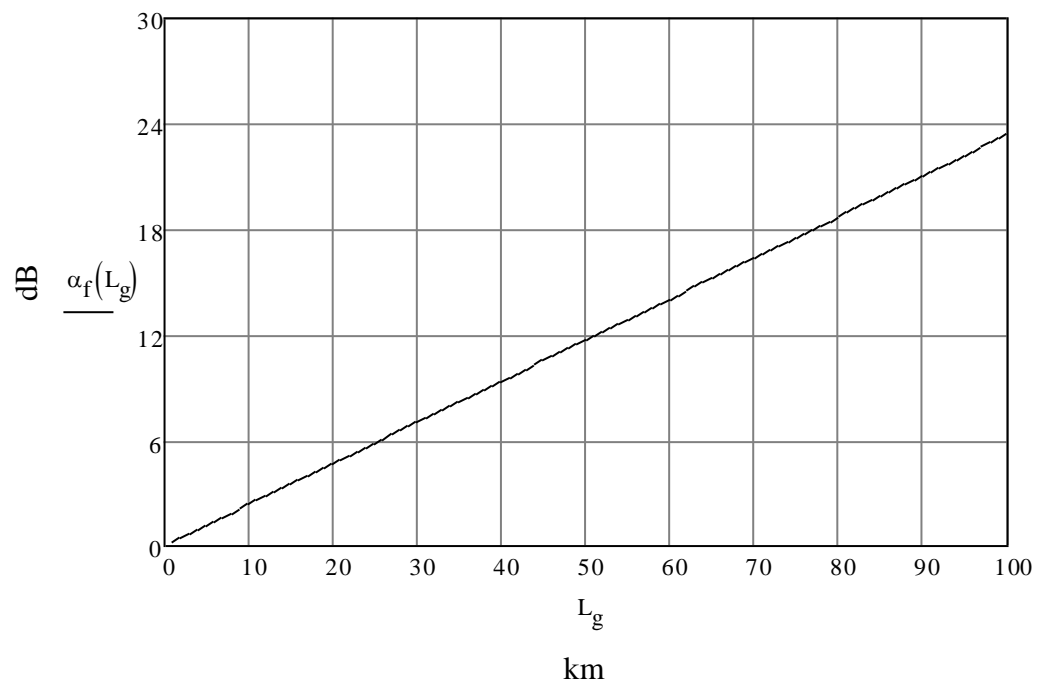
$$K_R := 1.2 \quad \text{dB} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\alpha_R := \frac{K_R}{\lambda^4} = 0.208 \quad \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

### Garuma rimšanas koeficients:

$$\alpha := \alpha_a + \alpha_R = 0.234 \quad \text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\alpha_f(L) := \alpha \cdot L \quad \text{dB}$$



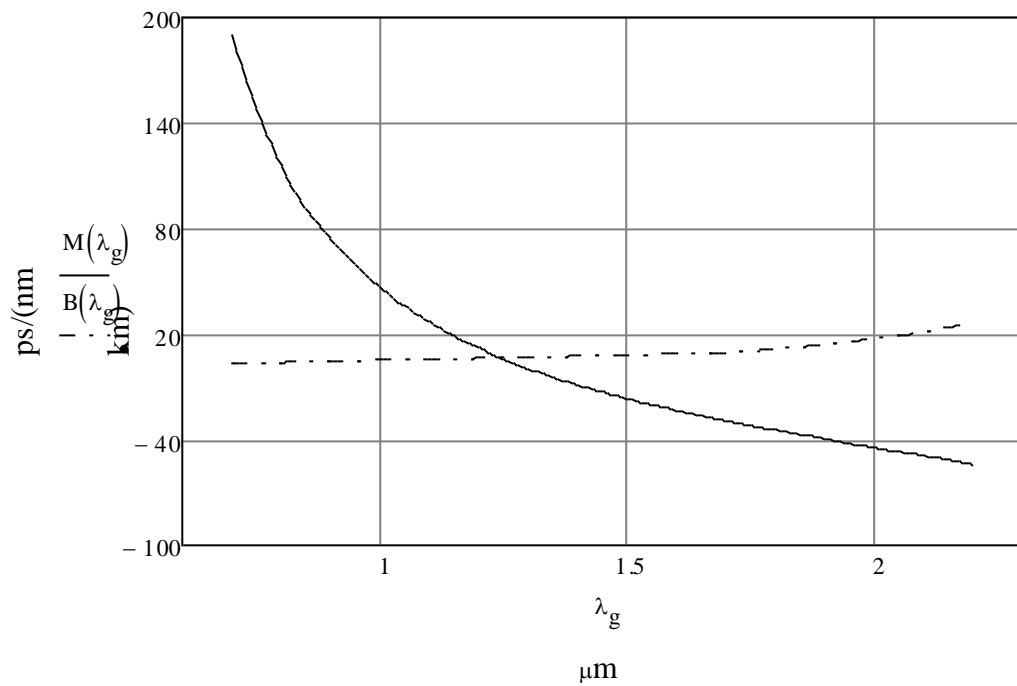
**Materiālās un viļņvada dispersijas atkarība no viļņa garuma:**

$\lambda_t :=$	$\mu\text{m}$	$M_t :=$	$\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$	$B_t :=$	$\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$			
						0.7	189.58	3.457
						0.8	114.875	3.967
						0.9	73.985	4.579
						1	46.584	5.182
						1.1	26.743	5.744
						1.2	12.175	6.315
						1.3	0.456	7.006
						1.4	-8.999	7.501
						1.5	-16.651	8.205
						1.6	-23.375	8.777
						1.7	-29.251	9.790
						1.8	-34.574	11.618
						1.9	-39.54	14.154
						2	-44.67	17.431
2.1	-49.137	21.561						
2.2	-54.069	26.547						

$$M(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, M_t), \lambda_t, M_t, \lambda_f) \quad \text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$$

$$B(\lambda_f) := \text{interp}(\text{pspline}(\lambda_t, B_t), \lambda_t, B_t, \lambda_f) \quad \text{ps} \cdot (\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$$

$$\lambda_g := 0.7, 0.71.. 2.2 \quad \mu\text{m}$$



### Materiālā dispersija:

$$M(\lambda) = -20.116 \quad \text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$$

$$\tau_{\text{mat}} := \Delta\lambda \cdot M(\lambda) = -40.233 \quad \text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$$

### Viļņvada dispersija:

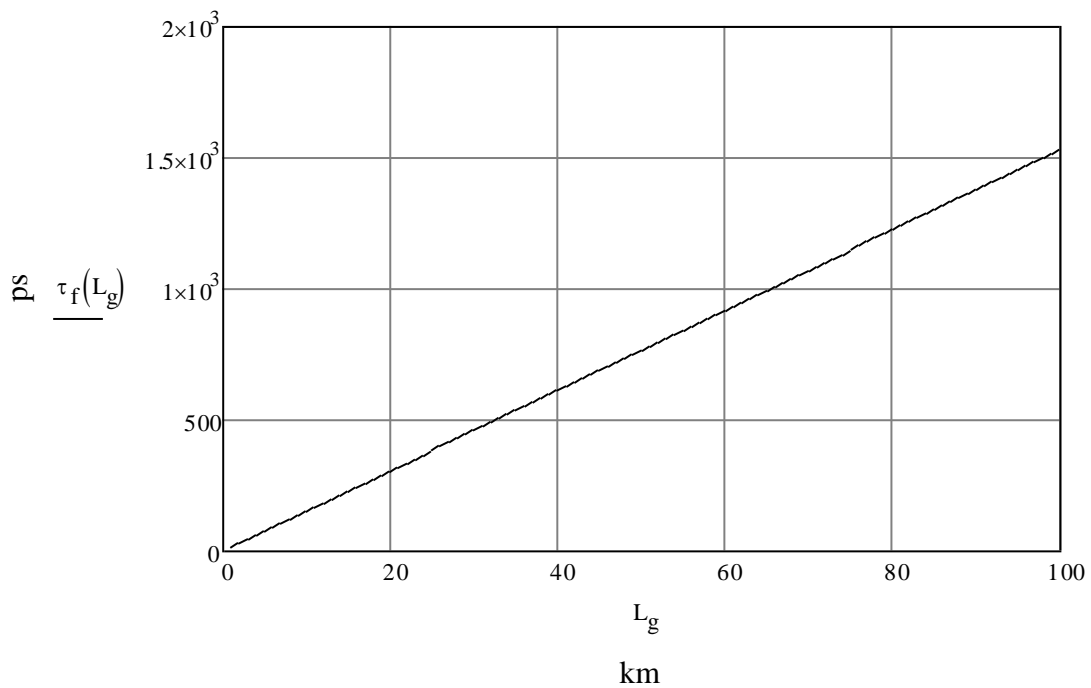
$$B := \frac{2n_1^2 \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot 10^9 = 27.769 \quad \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$$

$$\tau_v := \Delta\lambda \cdot B = 55.538 \quad \text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$$

### Kopējā dispersija:

$$\tau := \tau_{\text{mat}} + \tau_v = 15.305 \quad \text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$$

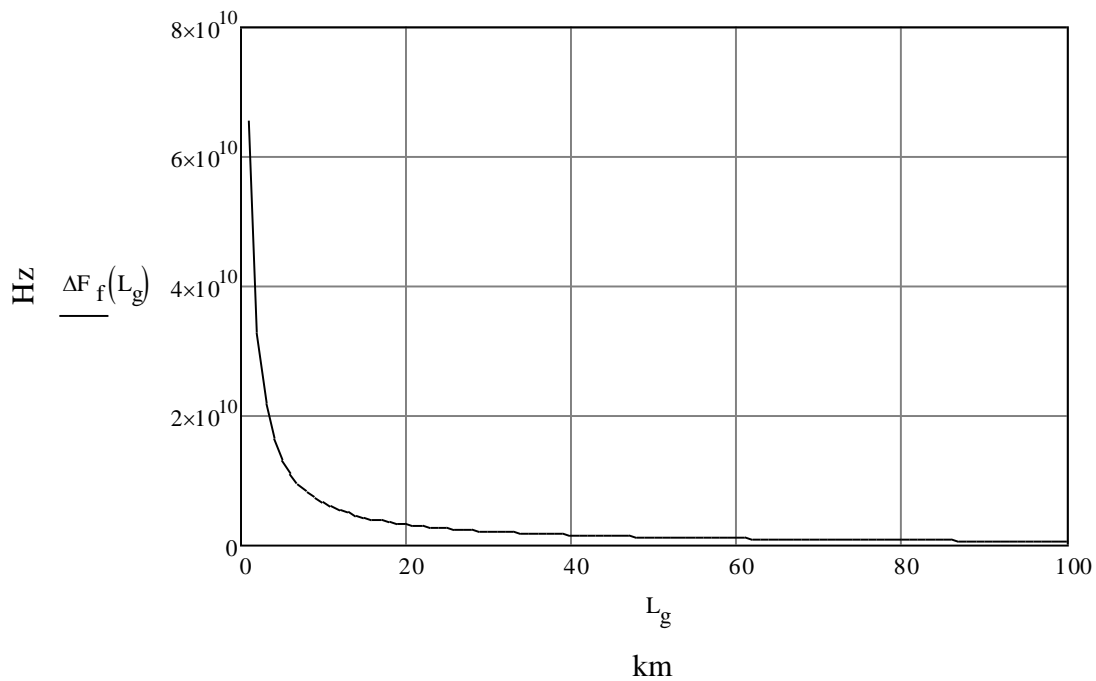
$$\tau_f(L) := \tau \cdot L \quad \text{ps}$$



### Kanāla caurlaides josla:

$$\Delta F := \frac{1}{\tau} \cdot 10^{12} = 6.534 \times 10^{10} \quad \text{Hz}$$


$$\Delta F_f(L) := \frac{1}{\tau_f(L)} \cdot 10^{12} \quad \text{Hz}$$



### Reģenerācijas iecirkņa garums:

$P_r := 5$	dBn	pārraides jaudas līmenis
$P_u := -2\epsilon$	dBn	uztvērēja jūtība
$\delta := \epsilon$	dB	enerģētiskā rezerve
$\alpha_r := 0.1$	dB	zudumi raidītājā
$\alpha_s := 0.1$	dB	zudumi savienotājā
$n_s := 2$		savienotāju skaits
$\alpha_{ns} := 0.1$	dB	zudumi nesadalāmā savienotājā
$n := 2$		nesadalāmo savienotāju skaits
$\alpha_{saz} := 4.3$	dB	zudumi sazarotājā
$n_{saz} := 2$		sazarotāju skaits

$$L_m := \frac{P_r - P_u - \delta - \alpha_r - \alpha_s \cdot n_s - \alpha_{ns} \cdot n - \alpha_{saz} \cdot n_{saz}}{\alpha} = 80.86 \text{ km}$$

	<b>TECHNICAL DATA SHEET</b>	code	<b>7701NH</b>
		version	<b>3</b>
	<b>NH (D2Y-NH 2x0.64 mm)</b>	page	<b>1/2</b>

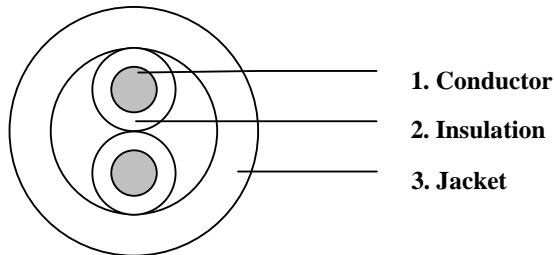
### OVERVIEW CODES

Code number	Color code xxxx	Put-up yyy	Color	Put-up length	Belden-EIW part number
50006	3536	000	White	305 -0/+30 meter	BG6628.1
50006	3536	500	White	500 -0/+50 meter	BG6628.2

### APPLICATION

Instrumentation and computer cables for data transmission applications.

### CONSTRUCTION



#### Conductor

Material	Solid bare copper
Dimensions	0.64 mm (AWG22)

#### 2. Insulation

Material	Polyethylene
Diameter	1.17 +/- 0.05 mm
Minimum wall thickness	0.23 mm
Colors in twisted pair	white/blue and blue/white; ring marking
Stranding lay	30 mm

#### 3. Jacket

Material	FRNC
Diameter	3.50 +/- 0.4 mm
Min. wall thickness	0.45 mm
Color	White (like RAL 9003)


### REQUIREMENTS AND TEST METHODS

#### Electrical:

Nominal impedance (1-20 MHz)	100 Ohm
Nominal attenuation at 0.772 MHz	1.3 dB/100m
1 MHz	1.5 dB/100m
4 MHz	3.1 dB/100m
10 MHz	4.9 dB/100m
16 MHz	6.3 dB/100m

20 MHz

6.9 dB/100m

	<b>TECHNICAL DATA SHEET</b>	code	<b>7701NH</b>
		version	<b>3</b>
	<b>7701 NH (D2Y-NH 2x0.64 mm)</b>	page	<b>2/2</b>

Nominal capacitance conductor to conductor @ 1kHz 46 pF/m  
 Nominal conductor DC resistance @ 20°C 55 Ohm/km  
 Maximum operating voltage 300 V rms  
 Maximum continuous current per conductor 2.5 A

#### Mechanical and physical:

Maximum pulling tension 50 N  
 Minimum bending radius 80 mm  
 Copper weight 5.8 kg/km  
 Total weight 15.9 kg/km  
 Temperature rating -15 to + 80 °C  
 Flame resistance IEC 60332-3C  
 Applicable specification BS 7655 Section 6.1 table 1 LTS  
 3

#### MARKING

Color code	Sheath color	RAL	Text
3536	White	9003	BELDEN 7701NH 1 PAIR 22 AWG LSNH IEC 60332-3C

Datemarking: Yes; format YYDDD, where YY = 2 digit year number, and DDD = day of the year

Metermarking: Yes

#### PACKAGING

Put-up code	Put-up length	Put-up type
000	305 -0/+30 meter	Non-returnable reel
500	500 -0/+50 meter	Non-returnable reel

Each reel is labeled with the following data:

Belden Logo. Belden code number. Item description.


Length on the reel. Date of manufacture. CE-marking.



Belden CDT believes this product to be in compliance with the environmental regulations EU RoHS (Directive 2002/95/EC, 27 January 2003); this is valid for all material produced after the RoHS compliant date for this product.

© Belden Wire & Cable B.V.

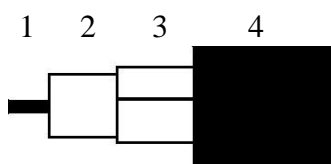
All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the written consent of the copyright owner

	<b>TECHNICAL DATA SHEET</b>	code	<b>CX3C1</b>
		version	<b>2</b>
	<b>COAX 3 FOAM F18 PE</b>	page	<b>1/2</b>

## APPLICATION

Coaxial cables used in cabled distribution networks designed according the European Standard EN 50117 operating at frequencies between 5 MHz and 2150 MHz and the International Standard IEC 1196.

## CONSTRUCTION




- |   |                 |   |
|---|-----------------|---|
| 1 | Inner conductor | Solid soft annealed copper                |
| 2 | Dielectric      | Gas injected PE                           |
| 3 | Foil            | Copper                                    |
| 4 | Sheath          | PE according the European Standard HD 624 |

## REQUIREMENTS AND TEST METHODS

**Test methods in accordance with European standard EN 50117-1.**

### Mechanical characteristics

- |                     |                                |                        |
|---------------------|--------------------------------|------------------------|
| 1. Inner conductor: |                                |                        |
|                     | Diameter:                      | 3.38 mm ± 0.03 mm      |
| 2. Dielectric:      |                                |                        |
|                     | Diameter:                      | 14.9 mm ± 0.2 mm       |
|                     | Centricity:                    | ≥ 0.85                 |
|                     | Adhesion:                      | 53 – 530 N at 50 mm    |
| 3. Outer conductor: |                                |                        |
|                     | Diameter screen:               | 15.3 mm ± 0.3 mm       |
|                     | Foil overlap:                  | ≥ 5 mm                 |
| 4. Sheath:          |                                |                        |
|                     | Diameter:                      | 18.00 mm ± 0.3 mm      |
|                     | Tensile strength               | ≥ 10 N/mm <sup>2</sup> |
|                     | Elongation at break:           | ≥ 300 %                |
| 5. Cable:           |                                |                        |
|                     | Crush resistance of cable:     | < 1% (load of 700N)    |
|                     | Storage/operating temperature: | -40°C to +70°C         |

	<b>TECHNICAL DATA SHEET</b>	code	<b>CX3C1</b>
		version	<b>2</b>
	<b>COAX 3 FOAM F18 PE</b>	page	<b>2/2</b>

Minimum installation temperature:	-5 °C
Maximum tensile strength of cable:	1200 N
Minimum static bend radius:	180 mm
Total weight:	267 g/m

### Electrical characteristics

Mean characteristic impedance:	75 ± 3 Ω
Regularity of impedance:	> 46 dB
DC loop resistance:	≤ 4.5 Ω/km
DC resistance inner conductor:	≤ 1.9 Ω/km
DC resistance outer conductor:	≤ 2.6 Ω/km
Capacitance:	54 pF/m ± 2 pF/m
Velocity ratio:	0.84 ± 0.02
Insulation resistance:	> 10 <sup>4</sup> MΩ·km
Voltage test of dielectric:	3 kVdc
Screening efficiency 30-1000 MHz:	≥ 100 dB
Return loss at 5-30 MHz:	≥ 26 dB*
30-470 MHz:	≥ 26 dB*
470-862 MHz:	≥ 22 dB*
862-2400 MHz:	≥ 18 dB*

\*Max. 3 peak values 4 dB lower than specified.

Attenuation at	Nominal	Attenuation at	Nominal
5 MHz:	0.4 dB/100m	800 MHz:	5.7 dB/100m
50 MHz:	1.3 dB/100m	1000 MHz:	6.5 dB/100m
100 MHz:	1.8 dB/100m	1350 MHz:	7.7 dB/100m
200 MHz:	2.6 dB/100m	1750 MHz:	9.0 dB/100m
400 MHz:	3.9 dB/100m	2150 MHz:	10.2 dB/100m
600 MHz:	4.8 dB/100m	2400 MHz:	10.9 dB/100m

Maximum attenuation is 10 % higher.



Belden declares this product to be in compliance with the environmental regulations EU RoHS (Directive 2002/95/EC, 27 January 2003); this is valid for all material produced after the RoHS compliant date for this product.

© Belden Wire & Cable B.V.

All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the written consent of the copyright owner

## Detailed Specifications &amp; Technical Data



METRIC MEASUREMENT VERSION

## LT096FM Fiber - Light Armor

For more Information  
please call

1-800-Belden1

**Description****Physical Characteristics (Overall):**

Fiber Type	Single Mode 125/245 Micron, Non-Dispersion Shifted
Number of Fibers	96
Core Diameter	8.3
Mode Field Diameter @ 1310nm	9.2 +/- 0.4
Mode Field Diameter @ 1550nm	10.5 +/- 1.0
Clad Diameter	125 +/- 1
Clad Non-Circularity	1.0% Maximum
Core-clad Concentricity Error	0.8 Microns Maximum
Primary Coating Material	Acrylate
Primary Coating Diameter	245 +/- 10
Buffer Tube Diameter	3.0
Buffer Tube Material	PBT - Polybutylene Terephthalate
Buffer Tube Filling Material	Synthetic Thixotropic Gel

## Buffer Tube Color Code Chart

Number	Color
1	Blue
2	Orange
3	Green
4	Brown
5	Slate
6	White
7	Red
8	Black

**Outer Jacket:**

Outer Jacket Material	High Density Polyethylene
Outer Jacket Nominal Wall Thickness	.055
Outer Jacket Diameter	15.824
Outer Jacket Ripcord	Aramid
Outer Jacket Color	Black

**Strength Member:**

Strength Member Material

Strength Member Material

**Detailed Specifications & Technical Data**



METRIC MEASUREMENT VERSION

**LT096FM Fiber - Light Armor**

Armor Type	Corrugated
Armor Material	Steel
Armor Thickness	.006

**Overall Cabling:**

Overall Cabling Fillers	Foam Polypropylene
-------------------------	--------------------

**Mechanical Characteristics (Overall):**

Operating Temperature Range	-40°C To +75°C
Storage Temperature Range	-40°C To +75°C
Bulk Cable Weight:	220.254 Kg/Km
Min. Bend Radius (Install):	317.500 mm
Min. Bend Radius for Long Term Application:	158.750 mm
Crush Resistance	Passes TIA/EIA 455-41
Impact Resistance	Passes TIA/EIA 455-25
Solar Radiation Resistance	High
Water Penetration	Passes TIA/EIA 455-82
Compound Flow	Passes TIA/EIA 455-81
Cyclic Flexing	Passes TIA/EIA 455-105
Twist Bend	Passes TIA/EIA 455-85
Max. Load for Installation:	2668.920 N
Max. Load for Long Term Application:	600.507 N
Proof Test:	689132 kPa

**Applicable Specifications and Agency Compliance (Overall):**

**Applicable Standards:**

Other Specification	RUS PE-90 Listed
---------------------	------------------

**Suitability:**

Suitability – Outdoor	Excellent
Suitability – Aerial	Fair
Suitability – Burial	Excellent

**Optical Characteristics (Overall):**

Maximum Attenuation @ 1310nm	0.35
Maximum Attenuation @ 1550nm	0.25

Point Loss @ 1310 & 1550nm	0.1
Dispersion @ 1310nm	< 3.5
Dispersion @ 1550 nm	< 18
Dispersion Slope	< 0.092
Zero Dispersion Wavelength	1300 - 1322
PMD	< 0.5
Cutoff Wavelength	< 1260
Refractive Index @ 1310nm	1.466
Refractive Index @ 1550nm	1.467

© 2007 Belden, Inc  
All Rights Reserved.

Although Belden makes every reasonable effort to ensure their accuracy at the time of this publication, information and specifications described herein are subject to error or omission and to change without notice, and the listing of such information and specifications does not ensure product availability.

Belden provides the information and specifications herein on an "AS IS" basis, with no representations or warranties, whether express, statutory or implied. In no event will Belden be liable for any damages (including consequential, indirect, incidental, special, punitive, or exemplary damages) whatsoever, even if Belden has been advised of the possibility of such damages, whether in an action under contract, negligence or any other theory, arising out of or in connection with the use, or inability to use, the information or specifications described herein.

All sales of Belden products are subject to Belden's standard terms and conditions of sale.

Belden believes this product to be in compliance with the following environmental regulations: California Proposition 65 Consent Judgment For Wire & Cable Mfgs.(San Francisco Superior Court Nos. 312962 And 320342); EU RoHS (Directive 2002/95/EC, 27-Jan-2003); Material manufactured prior to the compliance date may still be in stock at Belden facilities and in our Distributor's inventory; and China Ministry of Information Industry order#39 (China RoHS). EU ELV (Directive 2000/53/EC, 18-Sept-2000); EU WEEE (Directive 2002/96/EC, 27-Jan-2003); EU BFR (Directive 2003/11/EC, 6-Feb-2003). The information provided in this Product Disclosure, and the identification of materials listed as reportable or restricted within the Product Disclosure, is correct to the best of Belden's knowledge, information and belief at the date of its publication. The information provided in the Product Disclosure is designed only as a general guide for the safe handling, storage, and any other operation of the product itself or the one that it becomes a part of. This Product Disclosure is not to be considered a warranty or quality specification. Regulatory information is for guidance purposes only. Product users are responsible for determining the applicability of legislation and regulations based on their individual usage of the product.