

HISTÓRIA VZNIKU TEÓRIE ELEKTRICKÝCH OBVODOV A DLHÝCH VEDENÍ

1. Ohmov zákon

Z historických zdrojov je známe, že Ohmov zákon bol známy zrejme už v roku 1780 anglickému vedcovi H. CAVENDISHOVI. Tento bohatý anglický šľachtic narodený vo Francúzsku žil životom utiahnutého samotára a nikto v jeho okolí netušil, čím sa vo svojich súkromných laboratóriách zaoberá. So sluhami komunikoval len pomocou lístočkov. V roku 1874 bol práve J. C. Maxwell poverený oživiť Cavendishove laboratóriá a zo starých záznamov zistil, že čudácky šľachtic urobil množstvo objavov z oblasti elektriny a magnetizmu. Tie boli neskôr "znovuobjavené". Takýto bol i osud Ohmovho zákona.

Tento zákon objavil nemecký vedec GEORG SIMON OHM (1789-1854) v roku 1825, aj keď ho Ohm dotiahol do dnešnej podoby až v roku 1826. Publikoval ho v práci *O elektrickej vodivosti kovov*, v ktorej vyložil závislosť elektrického prúdu od napätia zdroja a odporu vodiča. V tom čase už existoval zdroj trvalého prúdu (Voltov stĺp) a tým sa otvorili možnosti pre rozšírenie poznania "elektriny", ktoré boli dovtedy obmedzené na elektrostatiku. Ohm svoje rozhodujúce experimenty vykonával v školskom kabinete jezuitského gymnázia v Kolíne nad Rýnom, kde pôsobil ako gymnaziálny profesor matematiky a fyziky a bol medzi študentmi obľúbený. Výsledky jeho bádania vzbudili pozornosť a dokonca dostal od ministerstva školstva pozvánku na študijný pobyt do Berlína, kde potom zostal učiť. Jeho životopis možno nájsť v špeciálnej literatúre.

G. Ohm si predstavy o elektrine budoval na základe podobnosti medzi elektrickým prúdom a tepelným tokom. V tom čase už existovala veľmi pozoruhodná teória tepelnej vodivosti, vypracovaná Fourierom v roku 1822. Ohm preukázal, že pomery v jednoduchom elektrickom okruhu sú dané prúdom, napätím zdroja a odporom. Odpor je priamo úmerný dĺžke vodiča a nepriamo úmerný ploche prierezu vodiča.

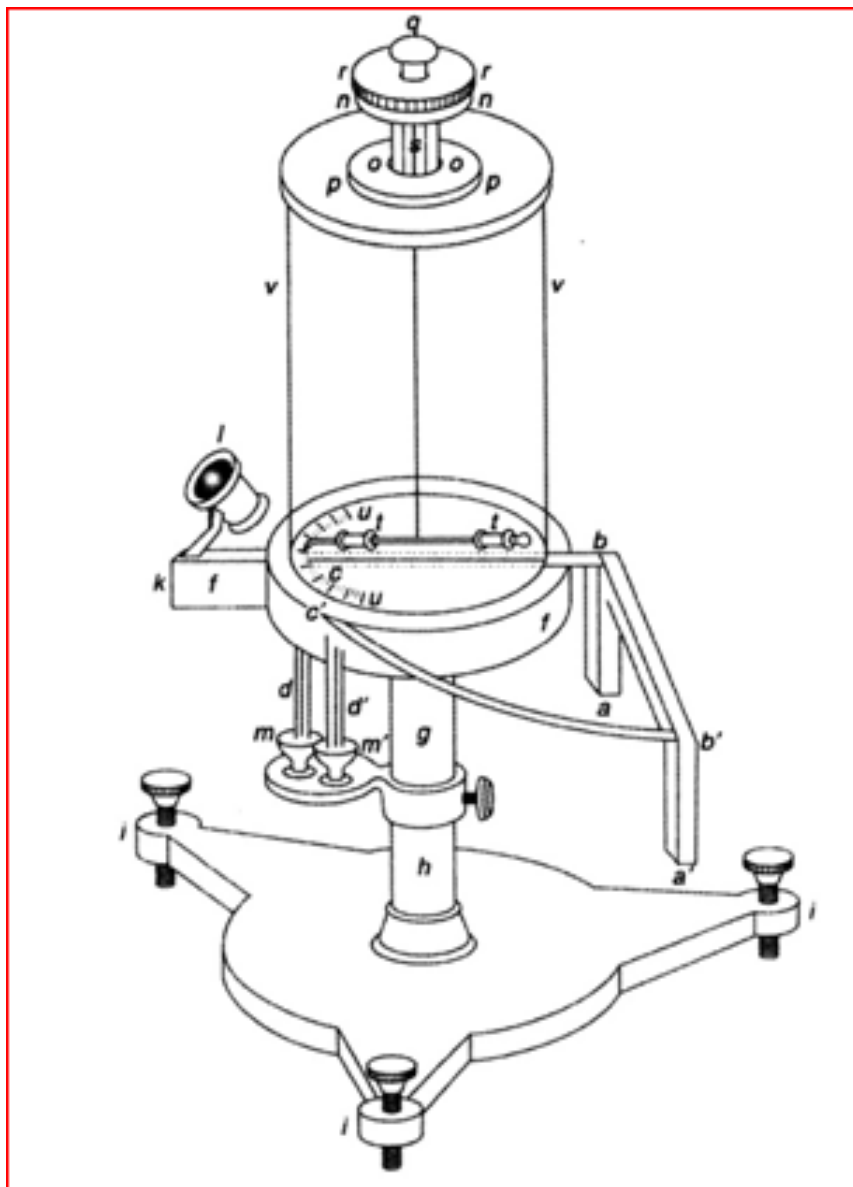
Spočiatku G. Ohm mal problémy a nedostával pri meraniach správne výsledky. Bolo to dané tým, že Voltov stĺp "nedržal napätie" a po zapojení do okruhu jeho napätie klesalo. Vydavateľ známeho vedeckého časopisu *Poggendorff's Annalen* profesor Poggendorff mu poradil, aby na svoje pokusy používal termočlánok (objavený v roku 1821), ktorý podľa neho poskytoval stálejšie napätie. V roku 1826 vykonal rad meraní prúdov vo vodičoch rôznych dĺžok a z rôznych kovov. Termočlánok pozostával z medi a bizmutu.

Torzný ampérmetr, na ktorom G. Ohm vykonával svoje experimenty, je znázornený na obr. 1. Ako a , b resp. a' , b' sú označené miesta spojov termočlánku, umiestnené jeden vo vriacej vode a druhý v topiacom sa ľade. Tak bol na kontaktoch termočlánku zaručený stály rozdiel teplôt 100 stupňov, a teda termočlánok poskytoval stále napätie. m a m' sú privody termočlánku do nádobiek s ortuťou. Magnetka t sa nastavuje do nulovej polohy pomocou torznej hlavice r . Uhol natočenia magnetky je úmerný veľkosti prúdu. Ohm si napríklad pripravil z medi vodiče rôznej dĺžky x . Tie postupne pripájal na zdroj napätia a torzným ampérmetrom meral magnetické pôsobenie prúdu na magnetku (odčítal uhol natočenia hlavice). Predpokladal pritom, že namerané číselné hodnoty možno vyjadriť rovnicou

$$X = \frac{a}{b+x} \qquad \left(I = \frac{U_e}{R_i + R} \right)$$

kde a a b sú konštanty súvisiace s napätím a vnútorným odporom zdroja, X je hodnota súvisiaca s uhlom natočenia torznej hlavice. (Vzťah vpravo predstavuje rovnicu v dnešnom zápise. Veličina v čitateli je elektromotorické napätie, v menovateli je súčet vnútorného odporu zdroja a odporu vodiča.) Ohm experimentálne po nájdení konštant a , b overil, že vzťah veľmi dobre vystihuje merané hodnoty.

Ohmova aparátúra nebola príliš precízna, i keď v súlade s dobou. Ohmov zákon bol spočiatku dokonca odmietaný, ale neskôr sa mu dostalo patričného uznania.



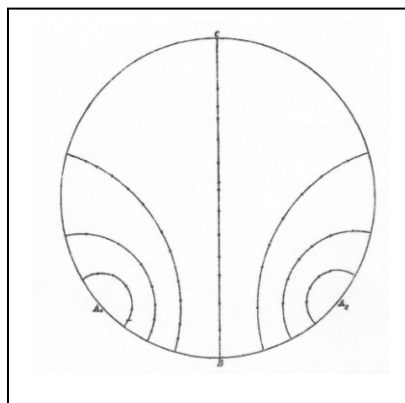
Obr. 1. Torzný ampérmetr s termočlánkom, na ktorom bol overovaný Ohmov zákon

2. Kirchhoffove zákony

Pre lineárne elektrické obvody s jednosmernými zdrojmi elektromotorického napätia sú Kirchhoffove zákony základom pre ich opis a navrhovanie. Ich autorom bol GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824 - 1887), nemecký fyzik, ktorý sa narodil v Kaliningrade a tam aj spočiatku pôsobil na Albertovej univerzite. Na tejto univerzite pôsobili viaceré významné vedecké osobnosti, ako napr. astronóm F. W. Bessel, matematik K. G. Jacobi a matematický fyzik F. E. Neumann, ktorý ho viedol ako študenta. Na základe veľmi pozoruhodnej seminárnej práce, ktorú neskôr premenil na doktorskú dizertáciu, dostal možnosť ísť na ročný študijný pobyt – zvolil si Berlínsku univerzitu, centrum teoretickej fyziky. Ako 24 – ročný sa habilitoval a neskôr odišiel na univerzitu vo Vratislavi. Neskôr pôsobil ako profesor

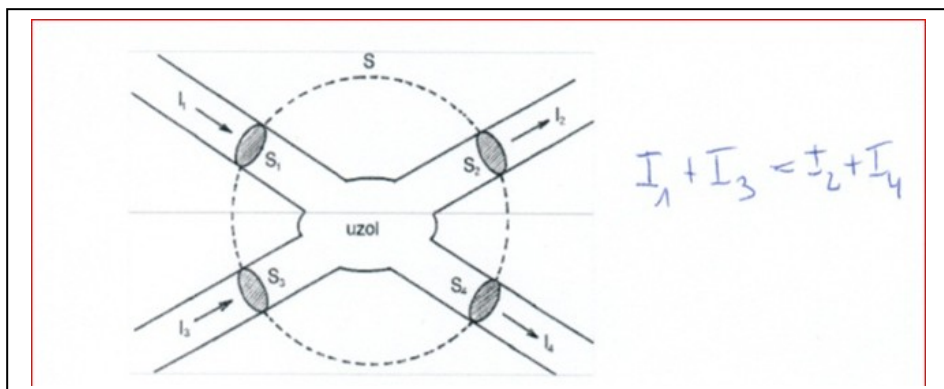
teoretickej fyziky v Heidelbergu a následne bol vedúcom katedry matematickej fyziky v Berlíne. Nemal vzťah k experimentálnej práci. Kirchhoffove zákony vznikli v rokoch 1845-49. Potom sa už Kirchhoff elektrickými javmi nezaoberal a vynikol skôr v iných oblastiach fyziky.

História odhalenia Kirchhoffových zákonov je určite zaujímavá. Profesor Neumann zadal vtedy 21-ročnému študentovi Kirchhoffovi zadanie seminárnej práce, v ktorom sa malo vyšetriť rozloženie prúdovej hustoty v kruhovom tenkom plechovom kotúči, na ktorý boli na jeho obvode pripevnené tenké vodiče. Principiálne šlo o výpočet plošného (dvojrozmerného) rozloženia stacionárneho prúdového poľa vo vodivom kruhovom kotúči. Kirchhoff úlohu riešil použitím vtedy už dobre známej a rozvinutej teórie potenciálu elektrického poľa. Vo svojej práci vyriešil problém nájdením plošného rozloženia čiar konštantného potenciálu (ekvipotenciálnych čiar) po povrchu kotúča. Teoretický výpočet overoval meraním na zhotovenom modeli vodivého kotúča sondou zapojenou do tzv. Wheatstoneovho mostíka (v dodatku k seminárnej práci dokonca odvodil aj podmienku rovnováhy Wheatstoneovho mostíka). Mapa Kirchhoffom vypočítaného rozloženia elektrického potenciálu je na obr. 2, ktorý bol uverejnený v roku 1845 v časopise *Annalen der Physik und Chemie*. V tomto článku formuloval KIRCHHOFF oba svoje známe zákony.



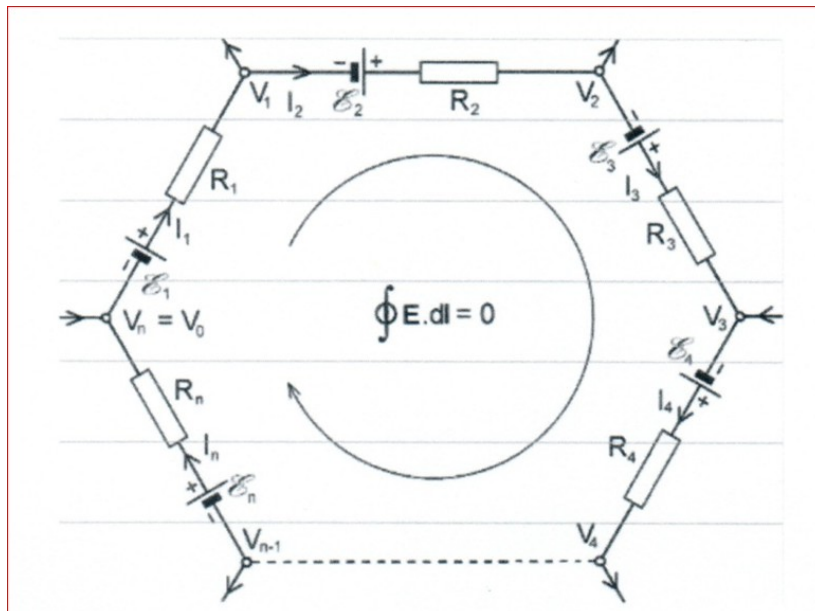
Obr. 2. Kirchhoffom v študentskej seminárnej práci vypočítaný a experimentálne overený priebeh ekvipotenciál na vodivej tenkej kruhovej doske, ku ktorej boli pripojené dva vodiče

Prvý Kirchhoffov zákon možno názorne vysvetliť pomocou obrázku 3.



Obr. 3. Prvý Kirchhoffov zákon. Vyjadruje vlastne rovnicu spojitosti ustáleného elektrického prúdu aplikovanú na prípad elektrického uzla, v ktorom sú vodiče spojené rôzne vodiče prúdu. Ak uzol obopneme uzavretou plochou, množstvo prúdu do nej vtekajúceho sa rovná množstvu prúdu z plochy vytekajúceho - v stacionárnom stave sa náboj v uzle nezhrádza.

Druhý Kirchhoffov zákon vyjadruje pravidlo, že v ľubovoľne zvolenej (orientovanej) slučke obvodu je súčet okamžitých hodnôt (elektromotorických) napätí rovný súčtu úbytkov napätí na odporoch a vnútorných odporov zdrojov. (Napätia a úbytky napätí majú pri matematickom vyjadrení rôzne znamienka v závislosti od orientácie slučky, polarity zdrojov a smerov prúdu. To je dobre známe z fyziky.) Možný prípad použitia 2. Kirchhoffovho zákona je na obr. 4.



$$\begin{aligned} V_0 - V_1 &= -\mathcal{E}_1 + R_1 I_1 \\ V_1 - V_2 &= -\mathcal{E}_2 + R_2 I_2 \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \\ V_{k-1} - V_k &= -\mathcal{E}_k + R_k I_k \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \\ V_{n-1} - V_n &= -\mathcal{E}_n + R_n I_n \end{aligned}$$

Ak tieto rovnice sčítame a uvažíme, že $V_0 = V_n$ je potenciál toho istého uzla, dostaneme po úprave rovnicu

$$\sum_{k=1}^n \mathcal{E}_k = \sum_{k=1}^n R_k I_k$$

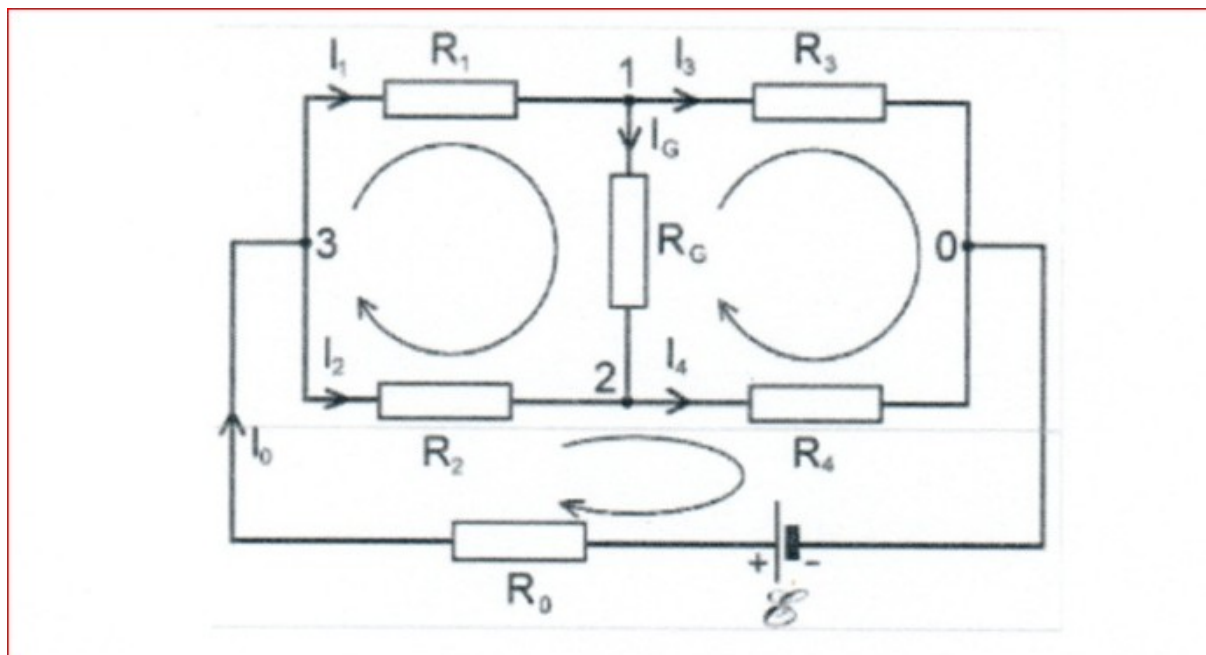
Obr. 4. Príklad aplikácie 2. Kirchhoffovho zákona. V tomto prípade všetky zdroje napätia majú polaritu v smere obehu rovnakú a aj prúdy majú rovnaký smer

Kirchhoffove vzťahy sa empiricky používali aj pred rokom 1845 na základe analógie s hydrodynamikou. Vtedy totiž panovala fluidová teória elektrických javov. Ale Kirchhoff nimi formuloval presné pravidlá, ktoré sa stali **základom teórie obvodov**. Neskôr Kirchhoff svoje práce prehľbil o tzv. *Kirchhoffove kombinačné pravidlá* (určenie potrebného počtu rovníc napísaných podľa prvého zákona = počet uzlov mínus 1. Potom počet rovníc

napísaných podľa druhého zákona musí byť taký, aby celkový počet rovníc bol rovnaký ako počet vetiev v jednotlivých častiach zložitého obvodu.)

Z hľadiska histórie treba povedať, že Ohmov zákon i Kirchhoffove zákony sa významnejšie začali používať až koncom 19. storočia v súvislosti s rozvojom telekomunikačných a elektroenergetických sietí.

Uvedme ešte Kirchhoffom definované pravidlo elektrickej rovnováhy vo Wheatstoneovom mostíku z roku 1845 (obr. 5).



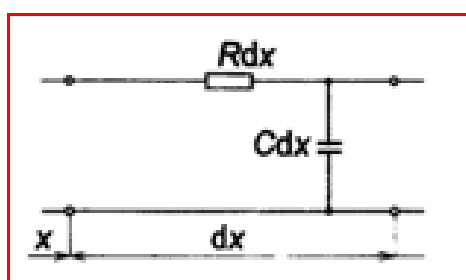
Obr. 5. Podmienky rovnováhy vo Wheatstoneovom mostíku. Ak jeden z odporov R_1 až R_4 je nastaviteľný, indikačným odporom R_G prúd nepotečie, ak platí $R_1 R_4 = R_2 R_3$. Mostík sa používa na meranie elektrických odporov.

3. Teória dlhých vedení

Pre diaľkový prenos informácií metalickými káblami a pre diaľkový prenos elektrickej energie sa ukázala ako veľmi potrebná teória tzv. vedení s rozloženými parametrami, ktorá umožňovala poznať procesy vznikajúce pri praktickej realizácii prenosu správ a elektrickej energie. Zakladateľom teórie dlhých vedení bol dodnes veľmi uznávaný škótsky fyzik WILLIAM THOMSON (1824-1907), ktorý neskôr prijal titul lord KELVIN. Aj keď Kelvin má významný podiel aj na rozvoji iných častí fyziky, napríklad termodynamiky, jeho prínos pre rozvoj elektromagnetizmu je výrazný. Bol jedným z fyzikov, ktorý začali budovať klasickú teóriu elektromagnetizmu s výrazným použitím matematického aparátu vytvoreného už vtedy zabudnutým matematikom Greenom (1845-50 vypracoval *Matematickú teóriu elektriny a magnetizmu*.) Bol tiež asi prvý, ktorý pochopil Faradayovu ideu siločiar a hoci bol aj potom dlho zástancom analógie medzi elektrickými, tepelnými a mechanickými javmi, výrazne prispel k rozvoju klasickej teórie elektromagnetického poľa aj tým, že na jeho myšlienky nadviazal J. C. Maxwell, s ktorým sa dobre poznal a ktorý postupne metódu analógie prestal používať. W. Thomson v roku 1853 vypracoval v práci *Elektromagnetické kmity a vlny* **teóriu výboja na kondenzátore**, v ktorej ukázal, že výboj má oscilačný charakter. Napr. Leidenská fľaša ak sa pripojí na slučku s iskrišťom, dostaneme vlastne oscilačný obvod s kapacitou a indukčnosťou. Odvtedy je známy Thomsonov vzorec pre rezonančnú kruhovú frekvenciu

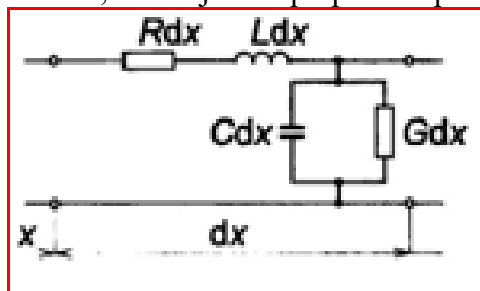
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

V polovici 50. rokov 19. storočia sa W. Thomson začína zaujímať o **prenos signálu v diaľkových kábloch**. Neskôr vypracoval aj projekt podmorského kábla na spojenie Európy a Ameriky a stal sa jeho vedúcom. W. Thomson vypracoval v roku 1855 prvú teóriu prenosu napätia v dlhom vedení, vytvorenú na základe analógie s Fourierovou difúznou rovnicou vedenia tepla. Pritom uvažoval, že na jednotku dĺžky kábla pripadá určitá hodnota odporu R a kapacity C . Táto rovnica však pre veľmi dlhé vedenia (nad 200 míľ) bola už veľmi nepresná a jej nedostatkom bolo i to, že sa v nej fakticky uvažovala nekonečne veľká rýchlosť šírenia signálu vo vedení (resp. neuvažovala sa táto rýchlosť vôbec), čo svojím slávnym pokusom v roku 1850 experimentálne vyvrátil Ch. Wheatstone.



Obr. 6. Thomsonov model dlhého vedenia

Významnú korekciu do neúplnej teórie dlhých vedení vypracovanej W. Thomsonom vykonal O. HEAVISIDE v roku 1881. Kelvinov model rozšíril o zvodovú vodivosť G a o indukčnosť pripadajúcu na jednotku dĺžky vedenia (obr. 7). Heaviside odvodil dodnes používanú **telegrafnú rovnicu**, ktorá je v podstate vlnovou rovnicou s konečnou rýchlosťou šírenia signálu s uvažovaním tzv. útlmu, súvisiacemu so stratami prenášanej energie. Heaviside ďalej dokázal, že napätia (aj prúdy) vo vedení možno považovať za akési vlnové funkcie, vznikajúce superpozíciou priamej a od konca vedenia odrazenej vlny.

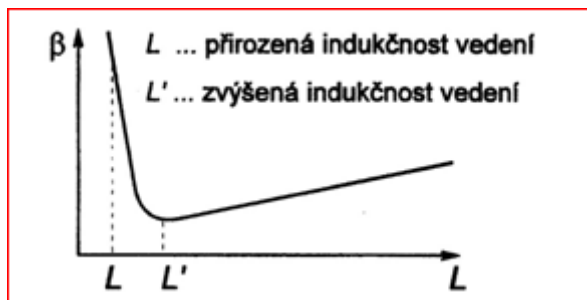


Obr. 7. Heavisideov model dlhého vedenia

Rozvojom telefónnych prenosov správ sa ukázalo, že

- jednotlivé frekvenčné zložky signálu sa šíria vo vedení rôznou rýchlosťou (disperzia)
- jednotlivé frekvenčné zložky majú rôzny útlm.

Tým vzniká **skreslenie prenášaného signálu**, takže sa zhorší zrozumiteľnosť prenášanej reči. Skreslenie rastie s dĺžkou vedenia.



Obr. 8. Závislost' útlmu vedenia na jeho indukčnosti

O. Heaviside ukázal, že skreslenie možno potlačiť, ak sa vedenie navrhne s parametrami tak, aby platilo

$$\frac{L}{R} = \frac{C}{G}$$

Prakticky sa možno tejto podmienke priblížiť tým, že sa na určitých vzdialenostiach (napr. 2 km) zaradí do vedenia indukčnosť vhodnej veľkosti.

Uvedený Heavisideov poznatok sa nestretával s pochopením. Hlavný inžinier Britského poštového úradu W. Preece tvrdil, že indukčnosť má byť čo najmenšia. Aj mnohí matematici sa postavili proti Heavisideovi pre jeho údajnú matematickú nekorektnosť. Jedine W. Thomson podporil správnosť Heavisideových výpočtov. Heaviside prežil zvyšok života v chudobe.

Jeho myšlienku použil a nechal si patentovať v USA v roku 1899 MICHAEL PUPIN (1858-1935), pôvodom Srb pôsobiaci na Kolumbijskej univerzite v New Yorku ako profesor. Tzv. pupinizácia telefónnych vedení priniesla telefónnym spoločnostiam obrovské zisky a zabudlo sa, kto za týmto objavom stál.

Heaviside bol i zakladateľom tzv. operátorového počtu (1887), ktorý umožňoval v obvodoch riešiť prechodné javy. Vytvoril ho intuitívne na základe skúmania fyzikálnych javov. Preto bol mnohými matematikmi odmietaný pre nízku rigoróznosť. Až oveľa neskôr sa ukázalo, že Heavisideom navrhnutý matematický spôsob riešenia obvodov je v zásade správny (exaktne to matematici dokázali až v roku 1950). Neskôr sa pod vplyvom používania striedavých harmonických prúdov začal používať v teórii obvodov tzv. **symbolický počet**, to jest vyjadrovanie napätí, prúdov a impedancií pomocou komplexných veličín.

Pri písaní tejto časti boli použité tieto pramene:

D. Mayer: Pohledy do minulosti elektrotechniky, nakladatel'stvo Kopp České Budějovice, 2004

R. Zajac, J. Šebesta: Historické pramene súčasnej fyziky, Alfa Bratislava 1990

+ rôzne zdroje získané z internetu