



POHLEDY DO MINULOSTI ELEKTROTECHNIKY

Seminární práce, která položila základy elektrotechniky

(Příběh Gustava Roberta Kirchhoffa)

1 Úvod

Dějštěm našeho příběhu je univerzita města, které se nachází na pobřeží Baltického moře. Město rozmarně měnilo svůj název: při výpravě proti pohanským Prusům jej ve 13. století založil český král „železný a zlatý“, Přemysl Otakar II., pod jménem Královec. Později se stalo hlavním městem Velkého Pruska a nazývalo se Königsberg, Poláci jej nazvali Królewic, v současnosti je součástí Ruské federace a nazývá se Kaliningrad. Chloubou města je staroslavná univerzita, založená r. 1544. Zprvu byla německá, nazývala se Albertinum, a po mnohých peripetiích spojila svůj název se jménem svého slavného profesora a rektora, nejvýznamnějšího evropského myslitele 18. století - nazývá se Ruská státní univerzita Immanuel Kanta. Na této univerzitě působili další světově proslulí profesori, například věhlasný astronom a matematik Fridrich Wilhelm Bessel, matematik Carl Gustav Jacob Jacobi; později se tato univerzita stala Almou mater matematikovi Davidu Hilbertovi a teoretickému fyzikovi Arnoldu Sommerfeldovi.

V našem příběhu hraje významnou roli profesor fyziky Franz Ernst Neumann (* r. 1798 v českém Jáchymově, † 1895 v Königsbergu), který byl v Německu zakladatelem teoretické (podle dobové zvyklosti nazývané matematické) fyziky. Proslul svými objevy v krystalografii a také v elektromagnetizmu, kde byl uznávaným odborníkem v „předmaxwellovském“ období (tj. elektrické a magnetické jevy vysvětloval „působením do dálky“ pomocí hypotetických fluid a elektromagnetické pole nepovažoval za rozhodující. Význačným přínosem F. E. Neumanna bylo zavedení vektorového magnetického potenciálu.) Neumann byl též výtečný pedagog; spolu s C. G. Jacobim založili matematicko-fyzikální seminář zaměřený na výchovu studentů k vědecké práci. Podobné semináře pak byly zaváděny i na dalších německých univerzitách.

Píše se rok 1844 a do Neumannova semináře se zapisuje student 3. ročníku, Gustav Rudolf Kirchhoff.

2 Student Kirchhoff a jeho seminární práce

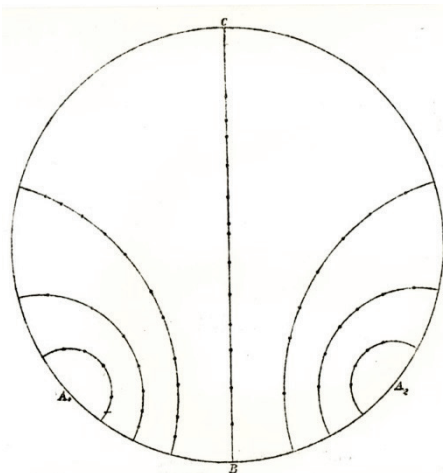
G. R. Kirchhoff se narodil z 12. března 1824 v Kaliningradu jako nejmladší ze tří synů soudního rady Karla Fridricha Kirchhoffa a jeho druhé ženy. Měl drobnou postavu, často stonal. Ve svém rodném městě vystudoval gymnázium a poté vstoupil na Albertovu univerzitu. Zájem o studium fyziky v něm vzbudili jeho učitelé, zejména astronom F. W. Bessel, matematik F. J. Richelot (s jehož dcerou Klárou se v r. 1857 oženil a měl s ní pět dětí), a především fyzik F. E. Neumann. Student Kirchhoff o tom píše v dopisu svému bratru Ottovi [12]: „... Neumann je nyní mým hlavním učitelem, jemuž naslouchám s největším potěšením a horlivostí. Jeho působením skončilo moje kolísání, které vědě se mám věnovat, a jsem pevně odhodlán zcela se přiklonit fyzice, ačkoliv jsou s tím

spojená nudná pozorování a ještě nudnější počítání. Pokud jde o to prvé, dělal jsem nedávno malou zkoušku, když jsem seděl od 10 hodin večer až do 2 hodin v Albertinu za dalekohledem a pozoroval jsem při teplotě pouhého 1°C po 15ti sekundách magnetku, jejíž polohu jsem musel zapisovat. Avšak při doutníku a s několika křehkými koláčky, které mi dala do aktovky moje starostlivá matka, uplynuly 4 hodiny rychleji, než jsem se nadál.“



Obr. 1. Gustav Kirchhoff v době svých univerzitních studií [13].

Když byl Gustav Kirchhoff ve třetím ročníku univerzitního studia (bylo mu 21 let, viz obr. 1), zapsal se do Neumannova semináře. Tématem jeho seminární práce bylo matematicky vyšetřit rozložení proudu v kovovém kotouči, jestliže přívod a odvod proudu jsou provedeny tenkými vodiči přiloženými k okraji kotouče. Jednalo se tedy o vyšetření stacionárního 2D proudového pole. Kirchhoff provedl nesnadné matematické řešení pomocí tehdy již poměrně dobře rozvinuté teorie potenciálu. Výsledky svých teoretických výpočtů verifikoval experimentem: určil rozložení ekvipotenciálních čar (obr. 2), jejichž průběh měřil sondou zapojenou do Wheatstoneova mostu. Svou seminární práci o rozsahu 16 stran nazval „O rozložení elektrického proudu v rovině, speciálně v kruhové desce“ [3]. V dodatku seminární práce odvodil podmínky rovnováhy mostu a právě k tomu účelu obecně formuloval ony vztahy, které jsou dnes označovány jako 1. a 2. Kirchhoffův zákon. Svou seminární práci uveřejnil Kirchhoff v roce 1845 v časopise *Annalen der Physik und Chemie* (viz obr. 3), vydávaném prof. J. Ch. Pogendorffem. O vědecké úrovni tohoto časopisu není pochybnost; na jeho stránkách byly uveřejněny objevy významných fyziků 19. století. Z metodologického hlediska je zřejmé, že Kirchhoff zkoumal vlastnosti Wheatstoneova mostu na základě (abstraktního) hydrodynamického modelu (je to mj. patrné z toho, že proud ve větvi označuje jako „Hydrokette“). S hydrodynamickými analogiemi se ovšem setkáváme při budování teorie elektromagnetizmu i u jiných badatelů, např. u Faradaye a Maxwella.



Obr. 2. Rozložení ekvipotenciál v kruhové desce, podle měření prováděného G. R. Kirchhoffem; v místech A_1 a A_2 jsou přívody k baterii [3].

1845. ANNALEN *No.* 4.
DER PHYSIK UND CHEMIE.
BAND LXIV.

I. Ueber den Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisförmige; vom Studiosus Kirchhoff,
Mitglied des physikalischen Seminars zu Königsberg.

Obr. 3. Titulní stránka Kirchhoffova článku [3].

Kirchhoffův objev tedy nebyl cílem seminární práce, byl jen jejím doplňkem; jeho český překlad je v [7]. Wheatstoneův most byl sestaven již v r. 1833 (jeho autorem nebyl Sir Charles Wheatstone, jak se dnes domnívá většina elektrotechnické veřejnosti, ale Samuel Hunter Christie, syn zakladatele dodnes prosperující známé aukční galerie v Londýně; podrobněji viz [8]). Lze namítnout, že v době, kdy se Kirchhoff zabýval můstkem ve své seminární práci, byla podmínka jeho rovnováhy již dobře známá. Ta však byla odvozena intuitivně, z Ohmova zákona (je známý od r. 1825) a z úvahy o rozložení napětí a proudu v můstku. Naproti tomu Kirchhoff formuloval oba zákony v jejich plné obecnosti a tím otevřel cestu k řešení všech elektrických obvodů.

Své myšlenky o řešení elektrických obvodů Kirchhoff pak dále rozváděl a v r. 1847 publikoval práci „O řešení rovnic, na něž vede vyšetření lineárního rozložení galvanických proudů“ [4]. Zde formuloval oba zákony, které dnes spojujeme s jeho jménem, matematicky přesně. Použil k tomu koeficienty incidence a vytvořil tím předpoklad pro jejich přehledný maticový zápis. Uplynulo však téměř 100 let, než byly do teorie elektrických obvodů zavedeny maticové metody a topologie obvodů byla popisována incidenčními maticemi. V práci [4] jsou též uvedeny zajímavé topologické vlastnosti elektrických obvodů, později označované jako Kirchhoffova kombinační pravidla, resp. topologické formule (podrobněji v [11]). V článku [5] pak uvedl souvislosti obou Kirchhoffových zákonů s variačními principy.

Kirchhoffově seminární práci se dostalo nebyvalého ocenění. Byla odměněna dvojnásobnou cenou Albertovy univerzity, byla podnětem ke jmenování Kirchhoffa externím

členem Fyzikální společnosti v Berlíně a po menších úpravách ji Kirchhoff předložil jako doktorskou dizertaci, na základě níž v r. 1846 promoval.

V korespondenci bratru Ottovi nalézáme toto sdělení [12]: „... Svou prací jsem získal cenu, a sice dvojnásobnou cenu. To bylo pro mne velké překvapení. Neměl jsem důvěru v kvalitu své práce a domníval jsem se, když mi před několika dny Neumann něco naznačil o udělení ceny, že to činí ze soucitu s mojí hypochondrií, kterou pozoroval. Že mi však byla udělena dvojitá cena, to je přece jen známkou toho, že na práci je něco dobrého. A to je pro mne velkým potěšením a dodává mi odvalu, abych v ní pokračoval. Při sepisování mi téměř všechna odvala došla a myslel jsem, že se mne Neumann zeptá, co jsem za ty 3 měsíce udělal. ... Tak usilovně jsem v životě nepracoval. Myslel jsem, že se zhroutím, až to bude hotovo. Leč quod non! Nikdy jsem se necítil tak šťastný a veselý ...“

Albertova univerzita udělila Kirchhoffovi v r. 1846 stipendium k postgraduálnímu studijnímu pobytu v Paříži. Na radu profesora fyziky na univerzitě v Berlíně H. G. Magnuse použil Kirchhoff stipendium k pobytu na berlínské univerzitě, jež byla tehdy významným centrem teoretické fyziky v Evropě.

O své cestě do Berlína píše svému bratru Ottovi s nadšením [12]: „... Půvab novoty, kterou pro mne měla cesta parním vozem, ... očekávání všeho toho, co mě čeká v Berlíně, to vše činilo mne neobyčejně šťastným.“

Kirchhoff se zabýval elektrickými obvody jen v poměrně úzkém časovém období let 1845 až 1849, později se ve své vědecké práci k elektrotechnice nevracel. Stejně jako jeho učitel Neumann, nebyl přívržencem Maxwellovy teorie elektromagnetického pole (z r. 1873), přestože právě z jejich obecnějších zákonů Kirchhoffovy zákony vyplývají.

3 Další vědecká dráha G. R. Kirchhoffa

Na berlínské univerzitě navázal Kirchhoff kontakty s významnými představiteli německé vědy, zejména s matematikou a fyzikou J. Ch. Poggendorfem, K. H. Knoblauchem a P. G. L. Dirichletem. V r. 1848 se habilitoval a v r. 1850 dostal nabídku místa mimořádného profesora pro obor experimentální fyziky ve Vratislavi.

V dopisu rodičům [12] o tom píše: „... Nevím, zda si to mám přát, povolání profesora matematické fyziky by bylo pro mne vhodnější a vítanější. ... Možná však, že pro mne bude blahodárné být přesazen do experimentování, stejně jako pro rostlinu, která je-li přesazena do jiné půdy, vyrůstá s novou silou.“ Kirchhoff nabídku přijal, ale teoretická fyzika mu byla bližší. Proto už v r. 1854 přešel na místo řádného profesora matematické fyziky do Heidelbergu, kde podle Neumannova vzoru zavedl matematicko-fyzikální seminář. Jako univerzitní profesor se věnoval mechanice pružných těles (např. formuloval teorii kmitů pružné membrány), hydrodynamice a termomechanice. Navázal úzkou spoluprací a osobní přátelství s profesorem fyziky Robertem Wilhelmem Bunsenem. V r. 1859 Kirchhoff referoval na zasedání berlínské Akademie věd o svém objevu zákona tepelného záření. Spolu s Bunsenem si povšiml, že ve spektru světla, jež prošlo chladnějšími parami sodíku, je místo charakteristické spektrální čáry sodíku tmavá čára (tzv. Fraunhoferova čára) a tento jev vysvětlili pomocí zákona tepelného záření, který před tím formuloval. Tím položili základy nové, velmi citlivé

metody spektrální analýzy, jež dovoluje s velkou přesností určit chemické složení a teplotu zářících těles. Touto metodou se jim podařilo doplnit periodický systém prvků o dva nové prvky alkalických kovů, cézium a rubidium. Kirchhoff pak dále pomocí spektrální analýzy zjistil, že Slunce a hvězdy jsou složeny z týchž chemických prvků jako Země. Jako první tím prokázal chemickou totožnost vesmírné hmoty a potvrdil Kantovu hypotézu o jednotném původu všech planet sluneční soustavy. Pro astrofyziku má tento objev zásadní důležitost, Kirchhoffovi přinesl světový ohlas a mj. členství v berlínské a petrohradské Akademii věd.

V dopisu svému bratru z r. 1860 píše [12]: „*Nechci nic méně a nic více než provést chemickou analýzu Slunce a možná i stálic. Neurazil jsem se, když mne jeden známý doktor filozofie během procházky řekl, že jakýsi blázen tvrdí, že objevil na slunci sodík. Pokoušel jsem se mu vysvětlit, že tento úkol není tak nemožný a přitom jsem jen těžko odolával pokušení říci mu, že tento blázen jsem já sám.*“



Obr. 4. Gustav Kirchhoff v době své profesury na berlínské univerzitě [13].

Kirchhoff působil na heidelbergské univerzitě 21 let. V r. 1875 se vrátil na univerzitu v Berlíně, kde až do své smrti vedl katedru matematické fyziky. Kirchhoff utrpěl vážný úraz a několik posledních let svého života musel používat invalidní vozík. Zemřel ve spánku, 17. října 1887, ve věku 63 let.

Jak se Kirchhoff jevil svým současníkům? Na jeho vědeckém díle i v pedagogické činnosti oceňovali především formální dokonalost. Ruský fyzik A. G. Stoletov, vzpomínaje svých studií na berlínské univerzitě, poznamenává [1]: „...*dar stručného, ale přesného vyjadřování – to je co jsme u Kirchhoffa obdivovali.*“

Podobný dojem zanechalo Kirchhoffovo pedagogické působení i na jeho dalšího slavného žáka, Maxe Plancka [10]: „...*Kirchhoff pronášel přednášku pečlivě připravenou, v níž dobře uvážené věty byly na správném místě. Ani jediné slovo nechybělo, ani jediné nepřebývalo. Celek však vyzníval suše a jednotvárně, jako věc naučená nazpaměť. Obdivovali jsme se přednášejícímu, nikoliv však tomu, co říkal.*“

Rok po Kirchhoffově smrti (r. 1888) se o Kirchhoffovi vyjadřuje Ludwig Boltzmann s entusiasmem [2]: „*Mezi Kirchhoffovými pojednáními jsou některá, jež vynikají neobyčejnou krásou. Krásou? – slyším vás, jak se ptáte; cožpak grácie neprchají z těch míst, kde integrály natahují své krky, což může být něco krásného tam, kde autorovi chybí čas k jakýmkoliv zdobným stylizacím? A přece – právě pro tuto jednodušost, pro tuto nepostradatelnost každého slova, každého písmene, každé čárečky se matematik mezi všemi umělci nejvíce blíží stvořiteli světa. ... Kdo pochybuje, že by mohla být matematická díla umělecky krásná, nechť si přečte Kirchhoffovo pojednání o absorpci a emisi, nebo oddíl jeho Mechaniky, věnovaný hydrodynamice.*“

4 Epilog

Na Kirchhoffově příběhu je pozoruhodné, že objev zásadního vědeckého významu učinil již ve věku 21 let, na počátku své vědecké dráhy. Tato skutečnost by měla být silně motivující pro současné studenty. Není totiž atypická, je spíše pravidlem. Neboť rané životní údobí vědce je nezatíženo tradičními představami a všeobecně uznávanými myšlenkovými šablonami. Jsou v něm relativně nejsilněji vyvinuty schopnosti myšlení plastického (tj. způsobu myšlení, jež se při neúspěchu snadno dokáže odpoutat od výchozích premis a dokáže je nahradit novými, správnými), rychlého a originálního [9].

Kirchhoff otevřel nový obor elektrotechniky – teorii elektrických obvodů. Ta, nejsouce podporována potřebami praxe, se vyvíjela zpočátku jen velmi zvolna. V monografiích o elektrotechnice z té doby se o Kirchhoffových zákonech hovoří jen sporadicky nebo se vůbec neuvádějí. K intenzivnímu rozvoji teorie elektrických obvodů a tím systematickému využívání Kirchhoffova objevu dochází až na přelomu 19. a 20. století, v souvislosti s rozvojem a budováním telekomunikačních a energetických systémů.

Prof. Ing. Daniel Mayer, Dr.Sc.

- [1] Baláž, P. *Význační fyzici*. Slovenské pedagog. nakl., Bratislava, 1966.
- [2] Boltzmann, L. *Gustav Robert Kirchhoff*. J. A. Barth, Leipzig, 1888.
- [3] Kirchhoff, G. Ueber den Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine Ebene, inbes. Durch eine kreisförmige. *Annalen der Physik und Chemie*, 1845, Bd. 64, pp. 497-514.
- [4] Kirchhoff, G. Ueber die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei der Untersuchung der linearen Vertheilung galvanischer Ströme geführt wird. *Ibidem*, 1847, Bd. 72, pp. 497-508.
- [5] Kirchhoff, G. Ueber die Anwendbarkeit der Formeln für die Intesitäten der galvanischen Ströme in einem Systeme bestehen. *Ibidem*, 1848, Bd. 75, pp. 189-205.
- [6] Kirchhoff, G. *Gesammelte Abhandlungen*. J. A. Barth, Leipzig, 1882.
- [7] Mayer, D. Příspěvek ke genezi Kirchhoffových zákonů. *Dějiny věd a techn.*, vol. 9, pp. 17-29.
- [8] Mayer, D. Uplynulo 200 let od narození Charlese Wheatstonea. *Elektro*, 2002, no. 2, pp. 45-47.
- [9] Mayerová, M., Mayer, D. Psychické předpoklady k vědecké práci. *Zpravodaj věd. prac.*, 1969, č. 1, str. 7-12.
- [10] Planck, M. *Vorträge und Erinnerungen*. Darmstadt, 1965.
- [11] Voss, W. Kirchhoffs Arbeit aus dem Jahre 1847: ein Meilenstein in der Wissenschaftsgesichte. *Acta historiae rerum naturalium*. Beginnings of Electricity Research, Editor: Technické muzeum, Praha, 2000, pp. 75-89.
- [12] Warburg, E. Zur Erinnerung an Gustav Kirchhoff. *Die Naturwissenschaften*, 1925, no. 13, pp. 205-212.
- [13] *Gustav Robert Kirchhoff* [on-line]. [citace 15. 10. 2016]. <<http://canov.jergym.cz/objevite/objev2/kir.htm>>.