

Půlstoleté jubileum Jednoty českých matematiků a fysiků v Praze

Bohumil Kučera

O významu charakteristik pro výklad elektrických zjevů výbojových

In: Václav Posejpal (author); Bohumil Kučera (author): Půlstoleté jubileum Jednoty českých matematiků a fysiků v Praze. (Czech). Praha: Jednota českých matematiků a fysiků, 1913. pp. 43–[53].

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/401968>

Terms of use:

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

na této dnešní slavnosti. Zaslal totiž již přede dvěma roky k rukoum předsedy Jednoty s podmínkou mlčelivosti obnos 5000 K na tuto dnešní 50letou slavnost. Bohužel sám se této oslavy nedočkal. Zemřel dne 16. ledna r. 1910.

Vaňaus, duch velký nadáním a sebekázní, nashromáždil tento skvělý dar spolu s tím, jež naši České akademii věnoval, ze svých skrovných příjmů, skromností a šetrností. Jeho věnování má tudíž vedle své ceny materiální velkou cenu morální. Jest velkolepým dokladem k tomu, o čem svou přednáškou jsem Vás chtěl přesvědčiti, ilustruje, co dle soudu mužů rázu Vaňausova Jednota a její činnost pro český národ znamenala a znamená, ukazuje, kam až sahá oddanost těchto mužů k Jednotě a jejich nadšení pro ni.

A tento krásný příklad Vaňausův buď nám vzorem, naplň naše srdce stejným ohněm, stejnou láskou i obětavostí ke krásným cílům naší Jednoty, jakými jeho hruď po tolik let v tichu ústraní plála. A pak najisto dojde uskutečnění skvělá budoucnost, na niž všechen dosavadní vývoj Jednoty ukazuje, i vroucí přání nás všech, jímž končím a jež jest: „Ať mohutní, ať roste, ať zkvétá Jednota českých matematiků“. (Potlesk)

III.

O významu charakteristik pro výklad elektrických zjevů výbojových.

Slavnostní přednáška prof. Dra. Boh. Kučery ve valném shromáždění Jednoty čes. math. a fys. dne 10. listopadu 1912. *)

Vzácné shromáždění!

Ode dávna poutaly mysl badatele i oko širokého publika zjevy elektrického výboje, překvapující stejné svou rozmanitostí, jako svým krásným vzhledem. A přece postrádaly po dlouhý čas

*) Podávám v následujících řádcích svou přednášku ve tvaru valně změněném. V shromáždění, kde se nalézalo mnoho neodborníků, omezil jsem výklady theoretické na míru nejmenší, klada důraz na předváděné pokusy. Zde naopak píše pro odborníky, mohu vývodům těm, třeba zcela elementárně podávaným, popřátí roli dominující, neboť prosté popisování překrásných výbojových zjevů, získaných dynamem stejnosměrným na 6000 Volt při 0·10 Amperech, bez vlastního názoru čtenářova by nemělo žádného smyslu.

delší půlstoletí výkladu, jenž by dovedl vysvětliti jejich podstatu a příčinu jich vzniku a různosti. Dodnes patří tento obor zjevů mezi ony partie fysiky, do nichž vnese plné světlo teprve příští intensivní práce experimentální i theoretická. Leč přece známe dnes alespoň v hlavních rysech směr, jímž příští badání se ponese; jest dán jednak iontovou resp. elektronovou teorií, jednak významnou prací Kaufmannovou o stabilitě elektrických výbojů*). Této práce a důsledků z ní týká se thema dnešní přednášky.

Abych illustroval hned z počátku, oč mi hlavně běží, dovoluji si obrátiti Vaši pozornost k zjevu velmi jednoduchému, mnohými z Vás často pozorovanému, k jiskře, která přeskakuje mezi koncovými kuličkami pracující elektriky, na př. moderní silnoproudové elektriky „Mercedes“ firmy Wehrsen v Berlíně. (Pokus.) Nejsou-li paralelně s jiskřištěm spojeny malé kondensátory, vzniká jiskra červenavá, jdoucí z anody až blízko ku katodě, kde na krátké části svoji dráhy je tmavá, jakoby přetržená a končící pak na povrchu katody jasnější skvrnou. Celý tento výboj ve vzduchu nebo jiném plynu obyčejného tlaku jest vlastně t. zv. výbojem doutnavým, který v plynu zředěném teprve jeví zcela patrně své složení, sloupec anodický, tmavý prostor Faradayův a světlo katodové oddělené tmavým prostorem Crookesovým, za malého zředění velmi úzkým, od zářivé prvé vrstvy katodové. Jakmile však zapneme paralelně s jiskřištěm kondensátor, promění se okamžitě vzhled jiskry, jež se stane bělejší a značně světlejší, s drahou nikde žádného přerušení nejevící; značný akustický efekt svědčí náhlému rozpětí thermickému. Starší popisy tohoto dávno pozorovaného zjevu nedovedly o něm říci nic jiného, než že jiskra „nekondensovaná“ odpovídá menšímu, „kondensovaná“ pak většímu množství přecházejícího elektrického náboje. Důvod různého vzhledu a souvislost s podmínkami vzniku vysvětliti nedovedly, stejně jako u celé řady zjevů jiných

Výklad nový spočívá na zvláštnostech *charakteristiky jiskřiště* resp. výbojové dráhy (na př. ve výbojové trubici) vůbec.

*) W. Kaufmann: Elektrodynamische Eigentümlichkeiten leitender Gase. Annalen der Phys. 2, 158. 1900

Co nazýváme charakteristikou? Ve vodivém kruhu, v němž se nacházejí pouze kovové vodiče, je vztah mezi působící elektromotorickou silou E a intenzitou proudu J velmi jednoduchý; je dán Ohmovým zákonem $J = \frac{E}{W}$, kde W je odpor vodivého kruhu. Ale již na př. u dynamoelektrického stroje, kde daná elektromotorická síla resp. svorkové napětí samo závisí na intenzitě proudu odebíraného, není vzájemný vztah tak jednoduchým, a abychom snadno jej přehlédli, konstruujeme z pozorovaných dat „charakteristiku“ stroje, křivku, jejíž úsečky v pravouhlých souřadnicích udávají intenzitu proudu a příslušné pořadnice působící svorkové napětí. Zcela podobně sestavujeme i pro výbojové děje charakteristiku t. j. křivku $e = f(J)$ z empirických dat intenzity proudu J a napětí mezi konci výbojové dráhy e ; platí ovšem jen pro dané podmínky — tlak a jakost plynu, geometrický tvar elektrod a materiál, z nichž jsou zhotoveny. Tato charakteristika vyznačuje se tím, že nemusí nutně se stoupajícím J stoupat e tak, jak vyjadřuje to zákon Ohmův, nýbrž že často také v některých místech charakteristiky stoupajícímu J odpovídá klesající e .

Budiž křivka obr. 1. danou charakteristikou. Známe-li ji, pak můžeme velmi snadno určit intenzitu proudu J a svorkové napětí jiskřiště e (t. j. rozdíl potenciálů mezi oběma elektrodami výbojovými), je-li dána elektromotorická síla E_0 zdroje, z něhož výboj napájíme, na př. batterie akumulátorů nebo dynama na vysoké napětí, a odpor W do kruhu vně výboje zapojený. Platí dle zákona Ohmova obecně

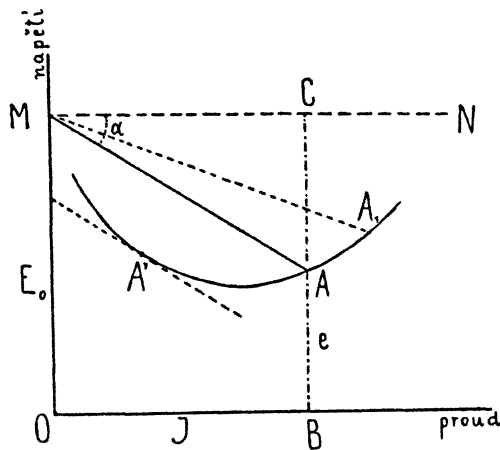
$$E_0 - e = JW. \quad (1)$$

Je-li tedy $OM = E_0$ dané napětí zdroje, kreslíme v bodě M rovnoběžku s osou absciss MN a přímkou MA , jež svírá s ní úhel α takový, že $tg \alpha = W$. Bod A , v němž protíná charakteristiku, dává nám příslušné veličiny e a J , neboť patrně

$$AC = J \cdot tg \alpha = J \cdot W = E_0 - e.$$

Zmenšuje-li se za stálého E_0 vnější odpor, tedy také α , jest výboj charakterisován na př. bodem A_1 . Zmenšuje-li se naopak za stálého vnějšího odporu (stálého α) napětí zdroje, jde

bod A po charakteristice zpět až za A do polohy A' . Zmenšíme-li napětí dále, nemůže proud existovat, výboj zhasne, nezměníme-li současně sklon přímky MA , t. j. nezměníme-li příslušně vnější odpor.



Obr. 1.

Každý bod charakteristiky, na př. A , znázorňuje tedy jistý stav výbojové dráhy, daný vztahem

$$E_0 - e = JW. \quad (2)$$

Vezměme v úvahu jiný velmi blízký k A bod, na př. a . Odpovídal by proudu $J + \delta J$ a napětí mezi elektrodami $e + \delta e$. Konstantní proud nemůže ovšem za těchto poměrů, t. j. leží-li a mimo charakteristiku, výbojovou drahou procházet, ale ovšem mohl by procházet proud proměnlivý, kde by k elektromotorickým silám E_0 a $-(e + \delta e)$ přistoupila e-m. síla od samoindukce pochodící a rovná

$$-L \cdot \frac{d(J + \delta J)}{dt} = -L \cdot \frac{d\delta J}{dt},$$

kde L je koeficient samoindukce. Pak platí dle Ohmova zákona

$$W(J + \delta J) = E_0 - e - \delta e - L \frac{d\delta J}{dt} \quad (3)$$

Odečteme-li od této rovnice rovnici (2), zbývá

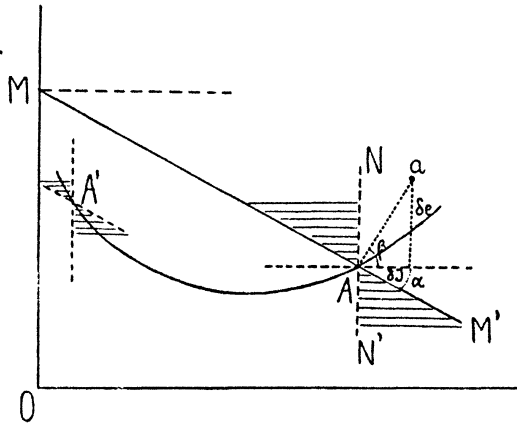
$$\frac{d\delta J}{dt} = -\frac{\delta J}{L} \left(W + \frac{\delta e}{\delta J} \right) \quad (4)$$

Mohli bychom tuto rovnici sice přímo integrovat, ale můžeme ji snadno diskutovati elementárně, všimneme-li si, že

$$\frac{\delta e}{\delta J} = \operatorname{tg} \beta,$$

kde β je sklon přímky Aa k ose úseček. Potom totiž

$$\frac{d\delta J}{dt} = -\frac{\delta J}{L} (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta). \quad (5)$$



Obr. 2.

Z tohoto vztahu je patrné, že, je-li $(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$ pozitivní (> 0), je $\frac{d\delta J}{dt}$ negativní, t. j. δJ klesá s časem, proud se vrací k hodnotě J , za kteréž jest *stabilní*. Je-li však $(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$ negativní, je $\frac{d\delta J}{dt}$ pozitivní, δJ s časem stoupá, proud uchyluje se čím dále tím více od původní hodnoty J , rovnováha odpovídající stavu A byla *labilní*. Velice snadnou úvahou se přesvědčíme, že případ prvý t. j. $(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta) > 0$ nastává vždy, když bod a leží (jako ve výkrese) v prostorech NAM' nebo MAN' . Uvnitř úhlů MAN nebo $N'AM'$ (na výkrese čárkova-

ných) je naopak $(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta) < 0$, poměry jsou labilní. Při-
 čiňme ještě hypotetický předpoklad, že pro posuzování stabi-
 lity nemají významu posunutí do jiných bodů a , leč těch, které
 leží na charakteristice. Tu plyne z naší úvahy, že proud J je
 stabilní pouze tehdy, probíhá-li charakteristika uvnitř úhlů ne-
 čárkovaných, labilní, leží-li uvnitř čárkovaných. Správnost tohoto
 kritéria byla řadou pokusů Kaufmannových stvrzena. Jsou-li po-
 měry voleny tak, že už předem leží charakteristika v úhlech
 čárkovaných (na př. za téhož odporu volbou E_0 , jak znázorňuje
 bod A' obr. 2.), tedy výboj vůbec nenastane. Kdybychom však
 bod A znenáhla na př. snižováním E_0 nebo zvyšováním vnějšího
 odporu W přivedli v místa labilní rovnováhy, stane se výboj
 nespojitým, nebo vůbec přestane. Přechodný stav mezi labilním
 a stabilním nastává, je-li $\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta = 0$, čili, jak můžeme
 přepsat,

$$W + \frac{\delta e}{\delta J} = 0.$$

To lze graficky snadno interpretovat: $\frac{\delta e}{\delta J}$ je trigonome-
 trická tangenta úhlu, který svírá tečná k charakteristice vedená
 s osou J . Je-li rovna $-\operatorname{tg} \alpha$, t. j. dotýká-li se právě spojnice
 s bodem M , kterou zveme W -přímkou, charakteristiky, na-
 stává za daného tím E_0 a W přechod ze stabilního do labilního
 stavu.

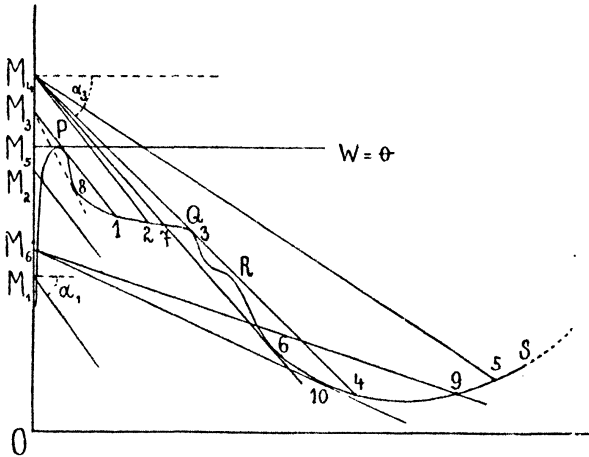
K osvětlení dosud uvedeného uvedeme několik příkladů.
 V obr. 3. je nakreslena (schematicky) charakteristika výbojová.

Prvá její část, prudce stoupající až ku P , odpovídá t. zv.
 výboji tmavému, nesmírně slabému proudu, který před výbojem
 zpravidla předchází. Druhá část P až Q odpovídá vlastnímu vý-
 boji doutnavému za studených elektrod, charakterisovanému ano-
 díckým sloupcem, Faradayovým tmavým prostorem a světlem
 katodovým.

Třetí, velmi zřídka pozorovaná část QR značí oblouk svě-
 telný za studené anody a žhavé katody (*H. D. Arnold* a *W.
 G. Cady*), a konečně čtvrtá část RS elektrický oblouk nebo jiskru
 za žhavé katody i anody.

Mějme nyní dosti veliký stálý odpor vnější daný sklonem
 α , W -přímkou. Zvyšujeme li vnější napětí nullou počínaje na

hodnoty $OM_1 = E_1$, $OM_2 = E_2$, nenastává viditelný výboj, nýbrž probíhá mezi elektrodami pouze nesmírně slabý, často galvanometrem nedokazatelný proud bez efektu světelného. Teprve dostoupí-li napětí hodnoty $OM_3 = E_2$, nastane náhle výboj doutnavý charakterisovaný bodem 1. Zvyšujeme-li napětí dále na $OM_4 = E_4$ za stejného odporu, je doutnavý výboj charakterisován bodem 2. Když odtud počínaje ponecháme stálé napětí a zmenšujeme odpor, tu při hodnotě $W_3 = \text{arc tg } \alpha_3$ náhle přeskóčí výboj doutnavý v el. oblouk (event. jiskru) daný bodem 4, za



Obr. 3.

náhlého klesnutí svorkového napětí (Kaufmann z 350 Volt na 30) a stoupnutí proudu, jenž rozžhvil elektrody. Při dalším snižování odporu oblouk trvá (bod 5), event. jsou-li experimentální prostředky dle toho až k hodnotě $W = 0$. Zvyšujeme-li však nyní odpor, nepřeskóčí oblouk ve výboj doutnavý již při hodnotě jeho rovné $\text{arc tg } \alpha_3$, nýbrž teprve za odporu většího tehdy, dotýká-li se W -přímky charakteristiky v bodě 6, kdy nastane stav, daný bodem 7.

Podobně je tomu při přechodu z výboje doutnavého ve výboj tmavý (přímky M_31 a M_38). Podobné zjevy nastávají také při měnění vnějšího napětí za stálého vnějšího odporu. K zánicení oblouku nebo doutnavého výboje je potřebí většího napětí

než k jeho udržování, tečná k charakteristice rovnoběžná s W -přímkou M_4 protíná osu pořadnic pod bodem M_4 . Tyto zjevy hysteretického rázu mají velikou důležitost při výkladu světelného oblouku napájeného proudem střídavým. Pro výboj doutnavý lze je pomocí zdroje vysokého napětí, spojitě měnitelného (dynamoelektrický stejnosměrný stroj na vysoké napětí s cizím buzením magnetů) a trubice asi na 2 až 0·5 mm vyčerpané oba snadno demonstrovati.

Je-li vnější odpor velmi malý $W \approx 0$, je W -přímka skoro horizontální. Stabilní stav, do něhož výboj po dostoupení napětí výbojového („jiskrového potenciálu“) $E_5 = OM_5$ z tichého výboje přeskočí, odpovídá oblouku o velmi vysoké intenzitě. Je-li vnější napětí $E_6 = OM_6$ menší než E_5 , nenastane žádná světelná forma výbojová. Můžeme však vznítiti na př. elektrický oblouk třebaš sražením úhlů nebo mezi elektrodami přeskočivši jiskrou (u některých tvarů rtuťových lamp), jak ukazuje bod 9; zvýšujeme-li tu odpor, nenastane po překročení bodu 10 výboj doutnavý, nýbrž výboj tmavý, jemuž elektrotechnika říká stav bezproudovosti, ačkoli ionty s pozitivním a negativním nábojem, jež jsou v plynech všudypřítomny, se od elektrody k elektrodě pohybují a tak jakýsi transport elektriny, ovšem nesmírně slabounký, zprostředkují.

Kaufmann projednal, ač jen theoreticky, také případ, kdy s výbojovou drahou paralelně je spojena kapacita; vývody jeho jsou poněkud komplikovanější. Plyne z nich, že stabilita nastává bezpodmínečně, je-li $\frac{\delta e}{\delta J} > 0$. Ale zde existuje velmi zajímavý případ, kdy totiž se výboj stává intermittujícím. Lze jej snadno demonstrovati. S výbojovou trubicí, vyčerpanou asi na 1 mm nebo něco méně tlaku, spojíme rovnoběžně slídovou kapacitu 0·1 až 1 Mikrofarad. Napájíme-li ji přes odpor ca 100000 Ohmů nebo více tak, aby bez kapacity byl mezi elektrodami (deštičkovými, asi 20 cm od sebe vzdálenými) rozdíl potenciální ca 500 Volt (t. j. vnější napětí stroje je ca 1500 Volt), vzniká typický výboj doutnavý, který zařazením kapacity úplně změní svůj charakter — v intervalech $\frac{1}{10}$ až 1 sekundy zazáří jinak tmavá trubice světlym, celou trubicí vyplňujícím výbojem, z něhož úplně vymizely oba tmavé prostory, takže spíše se dá srovnati s el. obloukem

nebo „kondensovanou“ jiskrou. Intermittence je tím rychlejší, čím je kapacita nebo vnější odpor menší. Populárně mohli bychom na zjev pohlížeti asi tak, že po vybití potřebuje kapacita tím větší čas, než se znovu k prohnání nového výboje trubici dostatečně nabije, čím je větší sama a čím je větší vnější odpor. Snadno docílíme také intermittence tak rychle, že se pozná jen v kruh kapacitní vřazeným telefonem.

Leč nyní se vraťme ještě k příkladu, jímž jsme svoje výklady začali, totiž ke „kondensované“ a „nekondensované“ jiskře. I zde podává nám theorie charakteristik bezpečné vodičko. Dosud jednali jsme stále o výbojích takových, kde bylo k dispozici vnější napětí stálé, výbojem se neměncí. Toho ovšem při výboji jiskrovém není; elektrika dodává sice stále jakési množství elektriny, které hromadí se bez výboje na jiskřišti nabije je na vysokou potenciálnou difference. Nastane-li však výboj, tu tato pot. difference velmi rychle klesá, tím rychleji, čím menší byla kapacita jiskřiště. A tím je také dáno vysvětlení zjevu. Dostoupí-li za malé kapacity napětí mezi elektrodami „potenciálu jiskrového“ (OM_6 v obr. 3.), začne děj jiskry, který se skončí po proběhnutí malé části charakteristiky odpovídající výboji doutnavému. Je-li jiskřiště spojeno s polepy kondensátorů, vydrží tyto dodávati potřebné napětí ještě po nesmírně krátce trvajícím proběhnutí stadia výboje doutnavého, až k stadiu světelného oblouku, jímž „kondensovaná“ jiskra vskutku jest. A věru proběhne v krátkém čase trvání jiskry, zlomku miliontiny vteřiny, proud ohromně intenzivní výbojovou drahou, který také stačí k tomu, aby bodová místa elektrod, v nichž se nasazuje, rozžhavl tak, že se vypařují, jak nám ukazuje spektroskop. Ovšem jsou tyto ohromné teploty a proudy způsobeny právě jen krátkostí děje, nikoli snad velikým množstvím energie, jež dějem se transformuje z elektrické v tepelnou. Že takováto jiskra je podstatou svou vlastně el. obloukem, o tom poučuje nás jednoduchý pokus, vložíme-li mezi kapacitu a jiskřiště veliký odpor, kus mokré šňůry: jiskra má delší trvání, stává se tlustší a žlutavou, el. oblouku podobnou. Střelný prach zapálí, kdežto krátce trvajícím jiskra bílá jej tepelnou explozí okolního vzduchu rozmetá, dříve než mohl chytití. Vhodnými odpory mezi kapacitu a jiskřiště vloženými můžeme ostatně zachytití elektr. jiskru v libo-

volném stadiu křivky obr. 3; velmi velikými odpory snadno docílíme prvního stadia, obdobného jiskře „nekondensované“, doutnavého výboje.

Předchozími vývody, doufám, že jsem Vám s důstatek nastínil veliký význam, který mají charakteristiky pro pochopení zjevů el. výbojů. Jest jen litovati, že vzhledem k velikým obtížím předmětu jest fysikální literatura dosud velmi chudou na systematické jich zkoumání, které mimo jiné často vyžaduje velikých prostředků experimentálních. Doufejme, že za dnešního mohutného vzruchu vědecké práce i tato mezera bude v brzku vyplněna tak, aby dnes mnou pouze naskizzovaný obraz mohl zdárně býti dokreslen.

