



ZÁKLADY FYZIKY

Modul 3 – Elektromagnetické pole

Milada Kopečná

Vytvořeno v rámci projektu Operačního programu Rozvoje lidských zdrojů
CZ.04.1.03/3.2.15.1/0016

Studijní opory s převážujícími distančními prvky pro předměty teoretického
základu studia.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

ESF – ROVNÉ PŘÍLEŽITOSTI PRO VŠECHNY

Obsah:

Informace o projektu	3
Úvod	4
Přehled učiva	5
Pokyny ke studiu	7
3.1. Elektrostatika	9
3.1.1. Elektrický náboj	
3.1.2. Coulombův zákon	
3.1.3. Intenzita elektrostatického pole	
3.1.4. Bodový náboj v elektrickém poli	
3.1.5. Elektrický potenciál	
3.1.6. Elektrické napětí	
3.1.7. Vodič a izolant v elektrickém poli	
3.1.8. Kapacita	
3.2. Vedení proudu	49
3.2.1. Základní pojmy	
3.2.2. Elektrický proud v kovech	
3.2.3. Elektrický odpor	
3.2.4. Práce a výkon proudu	
3.2.5. Elektrický zdroj napětí	
3.2.6. Kirchhoffovy zákony	
3.2.7. Vedení proudu v kapalinách	
3.2.8. Elektrický proud v plynech a ve vakuu	
3.2.9. Vedení proudu v polovodičích	
3.3. Vlastnosti magnetického pole	100
3.3.1. Definice magnetické indukce	
3.3.2. Indukční tok	
3.3.3. Pohyb nabité částice v magnetickém poli	
3.3.4. Síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli	
3.4. Vznik magnetického pole	123
3.4.1. Magnetické pole elektrického proudu	
3.4.2. Magnetické pole látek	
3.5. Elektromagnetická indukce	141
3.5.1. Faradayův zákon elektromagnetické indukce	
3.5.2. Vlastní a vzájemná indukce	
3.5.3. Vznik střídavého proudu	
Klíč	169

Studijní opory s převažujícími distančními prvky pro předměty teoretického základu studia

je název projektu, který uspěl v rámci první výzvy Operačního programu Rozvoj lidských zdrojů. Projekt je spolufinancován státním rozpočtem ČR a Evropským sociálním fondem. Partnery projektu jsou Regionální středisko výchovy a vzdělávání, s.r.o. v Mostě, Univerzita obrany v Brně a Technická univerzita v Liberci. Projekt byl zahájen 5.1.2006 a bude ukončen 4.1.2008.

Cílem projektu je zpracování studijních materiálů z matematiky, deskriptivní geometrie, fyziky a chemie tak, aby umožnily především samostatné studium a tím minimalizovaly počet kontaktních hodin s učitelem. Je zřejmé, že vytvořené texty jsou určeny studentům všech forem studia. Studenti kombinované a distanční formy studia je využijí k samostudiu, studenti v prezenční formě si mohou doplnit získané vědomosti. Všem studentům texty pomohou při procvičení a ověření získaných vědomostí. Nezanedbatelným cílem projektu je umožnit zvýšení kvalifikace širokému spektru osob, které nemohly ve studiu na vysoké škole z různých důvodů (sociálních, rodinných, politických) pokračovat bezprostředně po maturitě.

V rámci projektu jsou vytvořeny jednak standardní učební texty v tištěné podobě, koncipované pro samostatné studium, jednak e-learningové studijní materiály, přístupné prostřednictvím internetu. Součástí výstupů je rovněž banka testových úloh pro jednotlivé předměty, na níž si studenti ověří, do jaké míry zvládli prostudované učivo.

Bližší informace o projektu můžete najít na adrese <http://www.studopory.vsb.cz/>. Přejeme vám mnoho úspěchů při studiu a budeme mít radost, pokud vám předložený text pomůže při studiu a bude se vám líbit. Protože nikdo není neomylný, mohou se i v tomto textu objevit nejasnosti a chyby. Předem se za ně omlouváme a budeme vám vděční, pokud nás na ně upozorníte.

Úvod

Elektromagnetické pole je třetím modulem kurzu Základy fyziky. Je určen studentům k opakování a samostatnému studiu středoškolské fyziky.

Stejně jako všechny ostatní moduly máte i tento modul k dispozici ve třech formách:

- ve formě multimediálního CD,
- ve formě programu přístupného přes internet,
- ve formě tištěného materiálu.

Obsahově se tyto materiály neliší, pouze LMS (Learning Management System), ke kterému se připojíte přes Internet, vám nabídne větší uživatelský komfort při kontaktu s tutorem a v organizačních záležitostech. Pro studium v době, kdy nemáte k dispozici počítač, byla jako doplňkový materiál vytvořena i tato tištěná verze.

Celý obsah modulu je obsažen v souborech studijních textů, kontrolních otázek a řešených příkladů. Vhodným výběrem položek z těchto souborů jsou vytvořeny logicky uzavřené celky – **studijní jednotky**. Ve 3. modulu je celkem 26 studijních jednotek, tj. 3.1.1. až 3.5.3.

Všechny studijní jednotky mají stejnou strukturu. Obsahují:

- **Studijní cíle**
- **Studijní čas**
- **Předběžné znalosti**
- **Texty T**
- **Kontrolní otázky... KO**
- **Řešené úlohy.....RU**
- **Shrnutí**

Všechny položky, které přísluší jedné studijní jednotce (včetně vzorců **V** a obrázků **O**) mají stejné identifikační číslo.

Přehled učiva

Kapitola 3.1.

Tato kapitola je notoricky spojována s prvním experimentem, se kterým učitel zahajuje výuku elektřiny – „tření tyče liščím ohonem“. I když liščí ohony na většině škol už došly, tento experiment má své opodstatnění a v inovovaných formách se provádí dodnes. Ve studentech vzniká často dojem něčeho zastaralého, něčeho co patří dávné minulosti. Nepodceňujte však tuto kapitolu, protože znalost a porozumění základním pojmům se kterými se seznámíte v této kapitole je bezpodmínečně nutná k dalšímu výkladu.

Co je tedy obsahem této kapitoly? Seznámíte se s elektrickým nábojem a jeho vlastnostmi, zopakujete si složení atomu. Vysvětlíme si silové působení mezi náboji. Naučíme se charakterizovat elektrické pole, tj. budeme definovat elektrickou intenzitu, potenciál a napětí. V závěru kapitoly budeme hovořit o důležité elektrické součástce – kondenzátoru a jeho vlastnostech.

Kapitola 3.2.

Tato kapitola je ve srovnání s předchozí daleko atraktivnější. Je však časově náročná s ohledem na její rozsah. V úvodu se budete zabývat vedením proudu v kovech. Zopakujeme si Ohmův zákon, vysvětlíme si na čem závisí elektrický odpor, naučíme se počítat výkon proudu a teplo, které ve vodiči s proudem vzniká. Tato část studentům obvykle nedělá potíže, protože řadu faktů si pamatují ze základní školy. Zvýšenou pozornost věnujte výkladu elektromotorického napětí.

Kirchhoffovy zákony a jejich aplikace při řešení obvodů je naopak pro studenty obávané téma. Podle mého názoru je to spíše psychologický problém. Proto jsem se tomuto tématu věnovala velmi podrobně.

Dále se seznámíte s vedením proudu v kapalinách a plynech. Výklad těchto témat se dost liší od předcházejícího výkladu. Převažuje zde kvalitativní popis nad kvantitativním. Jde tedy spíše o výklad principů a vztahů (vzorců) je zde velmi málo.

V závěru této kapitoly se seznámíte s mechanismem vedení proudu v polovodičích. Tato část bude pro vás náročná. Pro mne, jako autora, byla nejobtížnějším tématem z celého elektromagnetického pole. Chování polovodičů nelze vysvětlit na základě klasických představ, ke kterým jste se uchylovali v dosavadním výkladu. Je třeba vycházet z výsledků, za které vdčíme kvantové fyzice. A můj problém byl tedy následující: ve výkladu respektovat vaše možnosti vnímání a přitom dojít k závěrům, které jsou v souladu s výsledky kvantové fyziky. Do jaké míry se mi to podařilo, musíte posoudit sami.

Kapitola 3.3.

Nejspíš každý z vás držel v ruce magnet a dokáže popsat aspoň některé jeho vlastnosti. V této kapitole se budeme těmito vlastnostmi magnetického pole zabývat podrobněji. Naučíte se definovat magnetickou indukci, sílu, kterou magnetické pole působí na pohybující se elektrický náboj resp. na vodič s proudem, dozvíte se co jsou magnetické indukční čáry a indukční tok, vysvětlíme si princip elektromotoru.

Kapitola 3.4.

Co je příčinou vzniku magnetického pole, čím jsou tzv. feromagnetické látky výjimečné? To jsou otázky, na které budeme hledat odpověď v této kapitole. I zde je třeba říci, že mnohé odpovědi nejsou bez znalosti kvantové fyziky snadné.

Kapitola 3.5.

Zatím co z předešlého výkladu již budete vědět, že každý pohybující se elektrický náboj a tedy i vodič s proudem má za následek vznik magnetického pole, v této kapitole se dozvíte, že změna magnetického pole může být příčinou vzniku indukovaného elektromotorického napětí, resp. proudu. Důkladně se seznámíte z Faradayovým zákonem elektromagnetické indukce, naučíte se počítat velikost indukovaného napětí a určit jeho směr. Vysvětlíme si jak využíváme tohoto principu k výrobě střídavého proudu a při transformaci napětí.

Pokyny ke studiu

Při tvorbě tohoto modulu jsem se snažila maximálně aktivovat studenta k samostatné práci. Vycházela jsem z předpokladu, že sestavuji učební text pro

studenty, kteří se chtějí učit.

Pokud patříte k takovým studentům, pak mi dovoluňte několik poznámek ke studiu.

1.

Modul je chápán jako studijní materiál a nikde v něm není použito žádných donucovacích prostředků, modul neobsahuje žádné represivní prvky. Pedagog (tutor) vstupuje do vašeho studia pouze ve dvou případech:

- pokud ho vy sami požádáte o pomoc
- pokud vám zadá úkol a vyžaduje vaší odpověď. Tato forma komunikace je obvykle uvedena v úvodním harmonogramu kurzu.

2.

Fyzika se nedá studovat tak, že pouze čtete text. Je bezpodmínečně nutné mít vedle sebe papír a tužku. Když ve studijním textu narazíte na nějaké odvozování, dělejte si ho souběžně sami na papíře. Pokud se v textu říká „dosadíme-li z rovnice (a) do rovnice (b) dostaneme...“ – nevěřte textu a udělejte si to. Procvičíte si matematiku, získáte jistotu a sebedůvěru. Nezapomeňte, že **rozumět ještě neznamená umět**. Zopakujte si odvození nebo řešení příkladu sami bez pomoci skript nebo obrazovky. Snadno se můžete přesvědčit, že ne vždy se vám to podaří napoprvé. Učte se nakreslit si podle textu i obrázek. Na otázky, které jsou vám kladeny, hledejte nejdříve odpověď sami. Teprve potom si svou odpověď konfrontujte se správným řešením, které je u každé otázky uvedeno.

3.



Nejdříve se seznámte se **Studijními cíli**. Rozsah modulu (tedy studijní cíle) se v podstatě kryje se standardy fyziky pro gymnázia (se všeobecným zaměřením). Studijní cíle definují co máte umět po prostudování příslušné studijní jednotky. Doporučuji vám vrátit se ke studijním cílům po skončení studia příslušné studijní jednotky a promyslet si co k jednotlivým heslům studijních cílů patří a jak by jste na ně reagovali.



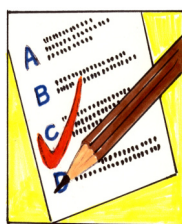
Ikona **Studijní čas** vám orientačně napoví, kolik asi času budete potřebovat k prostudování příslušné studijní jednotky. Tento čas ovlivňuje řada subjektivních a objektivních podmínek a není možné stanovit čas, který by byl reálným časem pro každého studenta. V každém případě nezáleží na čase, ale na tom, abyste skutečně dosáhli stanovených studijních cílů.



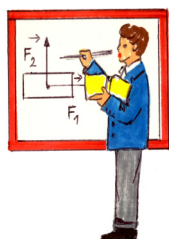
Pod ikonou **Předběžné znalosti** máte uvedeno, které pojmy je nutné znát před začátkem studia této kapitoly.



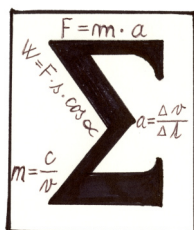
Celá teorie je vám předkládána po částech v poměrně „malých dávkách“ v tzv. **studijních textech (T)**. V těchto studijních textech jste často vyzváni ke spolupráci. Neodmítejte to. Každý poznatek, ke kterému dojdete vlastní prací je mnohonásobně cennější než správné řešení, které si bez práce přečtete v Klíči. Všude tam, kde se čeká od vás odpověď se setkáte se symbolem **?**. To platí v celém modulu, tedy i pro kontrolní otázky a řešené úlohy.



Mezi jednotlivé studijní texty jsou podle potřeby vložené **Kontrolní otázky (KO)**. Bezprostředně po prostudování teorie máte možnost procvičit si získané informace, resp. zkontrolovat sami sebe, zda jste správně pochopili právě prostudovanou látku. Přemýšlejte o otázce, promyslete si odpověď a teprve potom se podívejte na správné řešení. Nevynechávejte tyto kontrolní otázky, protože jsou v nich někdy nové poznatky, které už v textu nikde nenajdete. Některé kontrolní otázky vám dávají možnost vybrat odpověď z nabízených variant, pak může být správná jedna nebo i více možností. Setkáte se i s otázkami s tvořenou odpovědí. Vždy si nejprve otázku sami zodpovězte, pak teprve se podívejte na správné řešení. V tištěné verzi naleznete v klíči na konci modulu nejen správné řešení, ale často i zdůvodnění tohoto správného řešení.



Mezi studijními texty a kontrolními otázkami jsou podle potřeby vloženy také **Řešené příklady**. Tyto řešené příklady jsou v podstatě dvojího typu. Buď vyžadují znalost právě odvozených či uvedených vztahů do kterých dosadíte numerické hodnoty, nebo řeší problém, který vede k novým poznatkům.



Stručný souhrn učiva, kterým se zabývala příslušná studijní jednotka, najdete ve **Shrnutí**. Studentům, kteří chtějí redukovat své studium pouze na čtení Shrnutí, chci poradit aby to nedělali. Nejen že se takto fyziku nikdy nenaučí, ale je to navíc ztráta času.

Přeji vám hodně zdaru ve vašem studiu.

3. Elektromagnetické pole



T 3.0.0.-1

Až do počátku 19. století se elektrické a magnetické jevy zkoumaly izolovaně a byly považovány za zcela odlišné. Teprve r.1819 objevil dánský fyzik H.C.H.Oersted souvislost mezi oběma jevy. Zjistil totiž, že elektrický proud vychyluje magnetku stejně jako permanentní magnet. Ampére, Faraday a další, především pak J.C.Maxwell, se postarali o zásadní obrat v názoru na podstatu elektrických a magnetických jevů.

Pohybující se náboj vytváří ve svém okolí magnetické pole a časově proměnné magnetické pole je vždy doprovázeno časově proměnným polem elektrickým. Elektromagnetické pole, které je stálým spojením pole elektrického a magnetického, můžeme zkoumat odděleně jen ve zvláštních případech.

3.1. Elektrostatika



T 3.1.0.-1

V této kapitole se budeme zabývat elektrickými jevy vyvolanými náboji, které jsou vzhledem k pozorovateli v klidu.

3.1.1. Elektrický náboj



- umět vysvětlit vlastnosti elektrického náboje
- znát pojem „elementární náboj“
- znát jednotku náboje
- vysvětlit význam atomového a hmotnostního čísla
- vysvětlit zákon zachování elektrického náboje
- vysvětlit pojmy „vodič – izolant“



30 minut



Základní informace o stavbě atomu.



T 3.1.1.-1

Elektrický náboj je atributem (neodmyslitelnou vlastností) základních částic, z nichž se skládají látkové objekty kolem nás. Elektrický náboj je vždy vázán na částice látky a sám o sobě tedy neexistuje. Jednotka náboje v soustavě SI je coulomb (C). Existují dva druhy elektrického náboje: kladný a záporný.

Souhlasné elektrické náboje (téhož znaménka) se odpuzují, náboje nesouhlasné (opačného znaménka) se přitahují.

Stavební jednotkou látky je atom. Atom se skládá z částic trojího druhu: z elektronů, protonů a neutronů. Protony a neutrony tvoří jádro atomu, elektrony tvoří elektronový obal. Neutrony jsou částice elektricky neutrální, protony a elektrony jsou částice s elektrickým nábojem. Náboj protonu je kladný, náboj elektronu je záporný.

Velikosti obou nábojů jsou stejné a jsou rovny **elementárnímu náboji e** , který má přibližně hodnotu

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

V 3.1.1.-1

Náboj elektronu je $-e$, náboj protonu $+e$.

Libovolný náboj Q , který lze naměřit, může mít pouze hodnotu

$$Q = n \cdot e, \quad \text{kde } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

V 3.1.1.-2

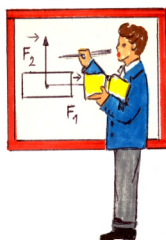
Můžeme například najít částici, která nemá žádný náboj (neutron), částici s nábojem $+3e$, nebo $-6e$ atd.

Pokud nějaká fyzikální veličina nemůže nabývat libovolné hodnoty, ale pouze hodnot nespojitých, říkáme, že je **kvantována**. Kvantem náboje je elementární náboj e .

Každý atom obsahuje v základním stavu stejný počet protonů a elektronů. Atomy a tedy i látky jsou za normálních okolností **elektricky neutrální**.

Elektrony v elektronovém obalu atomu jsou vázány elektrickými silami k jeho jádru. Odpoutá-li se z obalu jeden nebo více elektronů, vzniká z neutrálního atomu **kladný ion**, připojí-li se k obalu jeden nebo více elektronů, vzniká **záporný ion**.

Poměrně malými silami jsou vázány k atomovému jádru elektrony nejvíce vzdáleny od jádra. U kovů se tyto elektrony snadno od atomu odpoutávají a vznikají tak **volné (vodivostní) elektrony**.



RU 3.1.1.-1. Vysvětlete význam symbolů Z a A v chemické značce prvku ${}_Z^AX$.

Řešení:

Číslo Z udává počet protonů v jádru nebo počet elektronů v obalu a nazývá se **protonové číslo (atomové číslo)**.

Číslo A udává celkový počet částic (**nukleonů**) v jádru, tj. počet protonů a neutronů. Je to celistvé číslo nejbližší atomové hmotnosti a nazývá se nukleonové číslo nebo **číslo hmotnostní**.

Tedy atom daného prvku má v jádru Z protonů a $(A-Z)$ neutronů. Elektronový obal obsahuje Z elektronů.



T 3.1.1.-2

Látka za normálních okolností nemá elektrické účinky a říkáme, že je elektricky neutrální. Je-li nějakým způsobem porušena rovnováha mezi protony a elektrony, tj., má-li těleso nadbytek nebo nedostatek elektronů, říkáme, že je **elektricky nabitý** nebo že má elektrický náboj. Existuje mnoho způsobů, jak změnit rovnováhu mezi kladnými a zápornými náboji. Nejstarší způsob je tření.

Třeme-li ebonitovou tyč srstí, přejde část elektronů ze srsti na ebonit. Ebonitová tyč má nyní nadbytek elektronů a stává se záporně nabitá. Srst má nedostatek elektronů a je nabitá kladně. Při tření skleněné tyče hedvábím přejde část elektronů z tyče na hedvábí, takže tyč je kladně nabitá a hedvábná látka záporně elektricky nabitá.

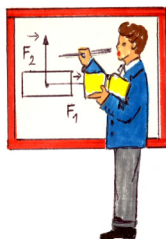
Z úcty k tradici jsme pro náš výklad použili ebonitovou a skleněnou tyč, kterou jsme třeli srstí resp. hedvábím. Pokud bychom použili jiné materiály zjistíme, že se všechny zeledrované tyče chovají buď jako zeledrovaná skleněná tyč (třená hedvábím), nebo ebonitová tyč (třená srstí).

Přívlastky „kladný“ a „záporný“ a jejich přiřazení elektrickým nábojům zeledrované ebonitové a skleněné tyče zvolil Benjamin Franklin zcela libovolně.

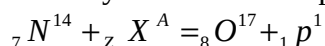
Třením se tedy náboj nevytváří, ale jen přerozděluje. Náboj se převádí z jednoho tělesa na druhé a tím se poruší původní elektrická neutralita obou těles. Náboj se přerozděluje tak, že

celkový počet jak kladných, tak i záporných nábojů se v izolované soustavě nemění (zákon zachování elektrického náboje).

Tento zákon platí jak pro makroskopická nabitá tělesa, tak i pro atomy, jádra a elementární částice.



RU 3.1.1.-2. Využijte zákona zachování náboje a zákona zachování hmotnosti v následující úloze. Při průchodu jistého záření ${}_Z^AX^A$ dusíkem, dochází k přeměně dusíku v kyslík a uvolní se proton podle rovnice:



Identifikujte neznámou částici, tj. vypočítejte její nukleonové a protonové číslo. $A = ?$, $Z = ?$

Řešení:

Vycházíme-li ze zákona zachování náboje, musí být součet atomových čísel dusíku a neznámé částice roven součtu atomových čísel kyslíku a protonu, tedy

$$7 + Z = 8 + 1 \quad \text{a tedy } Z = 2$$

U této přeměny musí platit i zákon zachování hmotnosti, tj.

$$14 + A = 17 + 1 \quad \text{a tedy } A = 4$$

Neznámá částice je α částice, tj. jádro helia ${}_2\text{He}^4$.



T 3.1.1.-3

Všechny látky dělíme podle jejich schopností přijímat a dále přenášet elektrický náboj na

- vodiče (kovy, slaná voda, lidské tělo)
- nevodiče (sklo, destilovaná voda, ebonit, vakuum).

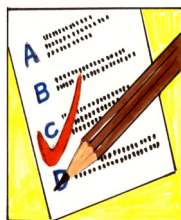
Vodičem je každá látka, která obsahuje volné elektrické částice (elektrony, kladné a záporné ionty). Ty se mohou ve vodiči pohybovat značně volně. U kovů jsou to volné (vodivostní) elektrony.

Nevodičem (též izolátorem nebo dielektrikem) je každá látka, která neobsahuje volné elektricky nabitě částice nebo jich má jen velmi málo. V dielektriku nedochází k přemisťování náboje (nebo jen minimálně).

Polovodiče (např. křemík, germanium) jsou látky, které mají vlastnosti mezi vodiči a izolátory.

Třením nabijeme každou látku, ale jen na izolantech se náboj udrží tak, že můžeme jeho účinky pozorovat. Na vodičích se náboj udrží jen tehdy, jsou-li dobře izolovány od země.

Uzemnit těleso znamená vytvořit vodivou cestu mezi tělesem a zemským povrchem.



KO 3.1.1-1. Popište pohyb volných elektronů ve vodiči, uzemníme-li

a) kladně nabitý vodič, b) záporně nabitý vodič.

? (Správnou odpověď najdete v **Klíči** na konci modulu.)

KO 3.1.1-2. Uvažujte dvě stejné osamocené elektricky izolované kovové kuličky. Jedna je nabitá kladným a druhá záporným nábojem stejné velikosti. Co se stane, spojíme-li koule

a) skleněnou tyčinkou, b) měděným drátem?

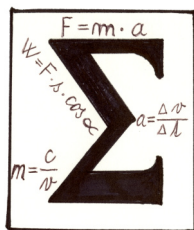
?

KO 3.1.1-3. Lze třením zelektrovat kovovou tyčinku?

?

KO 3.1.1-4. Proč je nebezpečné převážet benzin v plastových nádobách?

?



Stavební jednotkou látky je atom. Skládá se z protonů, elektronů a neutronů. Elektrony a protony jsou nositeli **elementárního elektrického náboje**. Náboj elektronu byl označen jako **záporný** a náboj protonu jako **kladný**. Náboje stejného znaménka **se odpuzují**, náboje opačného znaménka **se přitahují**. Těleso se stejným množstvím obou druhů náboje je **elektricky neutrální**. Těleso, ve kterém náboj není v rovnováze, je **elektricky nabitě**. Elektrický náboj **se zachovává**: celkový počet jak

kladných, tak i záporných nábojů se v izolované soustavě nemění. Jednotkou náboje je **coulomb (C)**.

Vodičem je každá látka, která obsahuje volné elektrické náboje. Ty se mohou ve vodiči volně pohybovat. **Nevodičem (izolátorem)** je každá látka, která neobsahuje volné elektricky nabitě částice nebo jich má velmi málo.

3.1.2. Coulombův zákon



- popsat vzájemné silové působení nabitých těles
- znát Coulombův zákon
- umět použít Coulombův zákon k výpočtu elektrické síly v případě dvou bodových nábojů



1 hodina



Síla jako vektorová veličina, jednotka síly. Vektorový součet. Newtonův gravitační zákon.



T 3.1.2-1

Nabitě těleso jehož rozměry vůči uvažovaným vzdálenostem můžeme zanedbat budeme nazývat **bodový náboj**.

Budeme předpokládat, že náboje jsou **ve vakuu** (pokud nebude řečeno jinak).

T 3.1.2.-2

Jak velkou silou na sebe působí bodové náboje ?

Uvažujme dva bodové náboje Q_1 a Q_2 ve vzdálenosti r . Mezi nimi působí **elektrostatická síla**, která může být odpuzivá (pokud náboje Q_1 a Q_2 jsou souhlasné) nebo přitažlivá (pokud náboje Q_1 a Q_2 jsou nesouhlasné).

Podle Coulombova zákona

velikost elektrostatické síly mezi dvěma bodovými náboji je přímo úměrná součinu velikostí obou nábojů a nepřímo úměrná čtverci jejich vzdálenosti.

Zákon můžeme napsat ve tvaru

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

V 3.1.2.-1

Konstanta „ k “ v tomto vztahu je rovna

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

V 3.1.2.-2

a má přibližně hodnotu $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$

Veličina ϵ_0 se nazývá **permittivita vakua** a její hodnota je

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

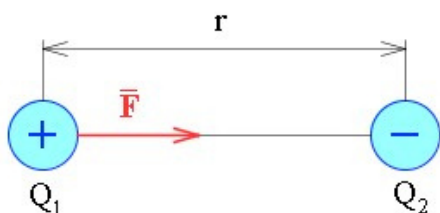
Toto silové působení je **vzájemné**. Sledujte následující obrázky:

O 3.1.2.-1a náboj Q_2 působí na náboj Q_1 silou $\vec{F}$

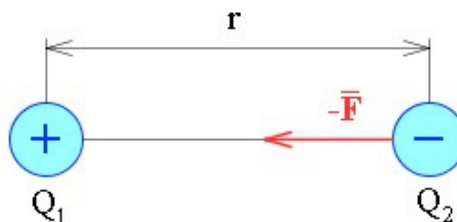
O 3.1.2.-1b..... náboj Q_1 působí na náboj Q_2 silou $-\vec{F}$

O 3.1.2.-1c dva nesouhlasné náboje se přitahují

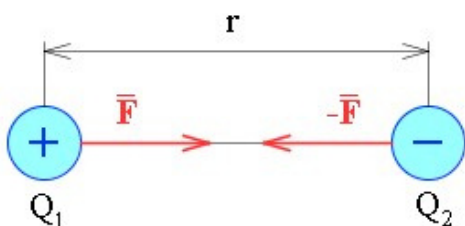
O 3.1.2.-1d dva souhlasné náboje se odpuzují



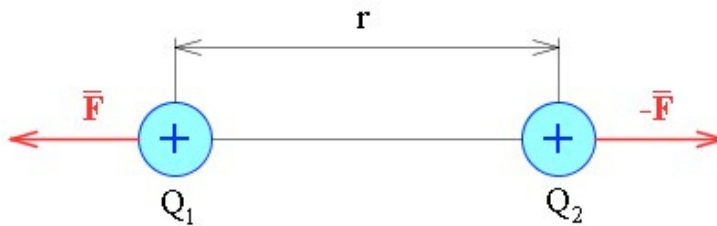
O 3.1.2-1a



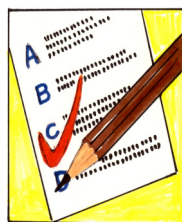
O 3.1.2-1b



O 3.1.2-1c



O 3.1.2-1d



KO 3.1.2.-1. Změňte obrázek O 3.1.2.-1d tak, že oba náboje jsou záporné a nakreslete vektory sil $\vec{F}$ a $-\vec{F}$.

?



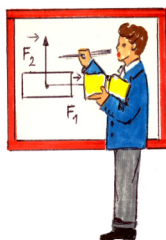
T 3.1.2.-3

Pokud jste si v této souvislosti vzpomněli na Newtonův zákon akce a reakce – máte pravdu. Síly $\vec{F}$ a $-\vec{F}$ jsou silami akce a reakce.

Jestliže uvažujeme více než dva náboje, platí V 3.1.2.-1 pro každou dvojici nábojů. Výsledná síla působící na každý náboj je dána vektorovým

součtem sil, kterými na náboj působí všechny ostatní přítomné náboje.

Coulombův zákon ve tvaru V 3.1.2.-1 platí jen pro bodové náboje a pro kouli. Vodivá koule nabitá rovnoměrně rozloženým nábojem přitahuje nebo odpuzuje nabitě částice stejně, jako kdyby veškerý náboj byl soustředěn v jejím středu. V ostatních případech je třeba použít jiné matematické metody.



RU 3.1.2.-1. Uvažujte dvě stejné osamocené elektricky izolované koule A, B. Vzdálenost jejich středů označíme x . Předpokládejme, že tato vzdálenost je dostatečně velká ve srovnání s poloměrem koulí a lze tedy koule považovat za bodové náboje.

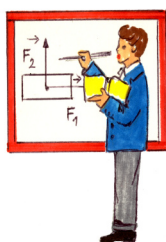
- Koule A má náboj $+Q$ a koule B je elektricky neutrální. Jak velká elektrická síla působí mezi koulemi?
- Koule jsou na okamžik spojeny velmi tenkým vodivým drátem. Pak je drát odstraněn. Jak velká je elektrostatická síla působící mezi koulemi, je-li drát odstraněn?
- Předpokládejme, že koule A je na okamžik uzemněna a pak je uzemnění přerušeno. Jaká bude nyní elektrostatická síla působící mezi koulemi?

Řešení:

- Pro elektrickou sílu platí Coulombův zákon. Náboj koule B je roven nule a proto elektrická síla mezi koulemi je rovna nule.
- Vodivé spojení obou koulí umožní přesun elektronů tak, že po odstranění drátu budou náboje obou koulí stejné $Q_A = Q_B = Q/2$ a pro velikost elektrostatické síly bude platit

$$F = k \frac{\frac{Q}{2} \frac{Q}{2}}{x^2} = k \frac{Q^2}{4x^2}$$

- Uzemnění bude mít za následek přechod elektronů ze země na kouli A tak, že zneutralizují náboj koule A. Je-li nyní náboj koule A nulový, je elektrická síla mezi koulemi rovněž nulová.



RU 3.1.2.-2. Jádru atomu železa má poloměr asi 4.10^{-15} m a obsahuje 26 protonů. Jak velká je odpudivá elektrostatická síla mezi dvěma protony, které jsou ve vzdálenosti 4.10^{-15} m? $F_e = ?$

Řešení:

- Velikost elektrostatické síly vyřešíme z Coulombova zákona. Zapište zákon a dosad'te. $F_e =$

?

Pokud se vám zdá, že je to malá síla, uvědomte si, že působí na proton o hmotnosti řádově 10^{-27} kg. Jen si zkuste spočítat jaké zrychlení by udělila tato síla vám a jaké protonu. Tak velké síly by musely způsobit destrukci jádra. Protože k tomu ale nedochází, musí existovat jiné přitažlivé síly, které kompenzují účinky elektrostatické odpudivé síly. Pokud vás v této souvislosti napadá přitažlivá síla podle Newtonova gravitačního zákona, máte pravdu v tom, že tato síla působí. Zkusme ale spočítat její velikost.

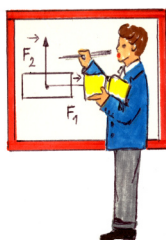
Vypočítejte velikost gravitační síly F_g , kterou na sebe působí tyto protony.

Její velikost budeme počítat podle vztahu

$$F_g = \kappa \frac{m \cdot m}{r^2}$$

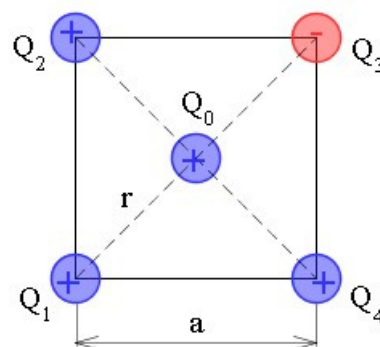
- Dosad'te numericky. Velikost gravitační síly je $F_g =$?

Z toho je vidět, že přitažlivá gravitační síla je řádově 10^{36} krát menší než elektrostatická odpuzivá síla. Gravitační síly jsou příliš slabé, aby mohly kompenzovat elektrostatické odpuzivé síly. V jádru musí tedy existovat jiné silné přitažlivé síly, které udržují stabilitu jádra.



RU 3.1.2.-3. V rozích čtverce (O 3.1.2.-2a) o straně 2 cm jsou umístěny čtyři náboje, jejichž velikosti jsou $Q_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ C}$, $Q_2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$, $Q_3 = -6 \cdot 10^{-7} \text{ C}$, $Q_4 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$. Ve středu čtverce je náboj $Q_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ C}$. Vypočítejte velikost výsledné síly, kterou náboje Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 působí na náboj Q_0 .

Postupovat budeme tak, že vyřešíme síly F_1, F_2, F_3 a F_4 které působí na náboj Q_0 a najdeme jejich výslednici.



O 3.1.2.-2a

Řešení:

$$Q_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ C}, Q_2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}, Q_3 = -6 \cdot 10^{-7} \text{ C}, Q_4 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}, Q_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ C}$$

$$a = 2 \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

- Vzdálenost všech čtyř nábojů od náboje Q_0 je stejná a je rovna polovině úhlopříčky čtverce.

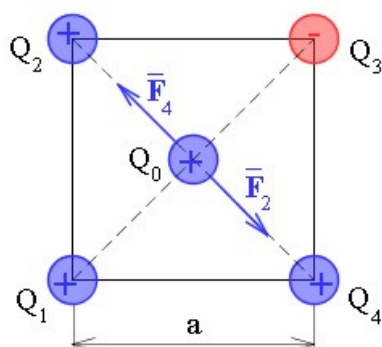
Vypočítejte velikost úhlopříčky $u =$?

?

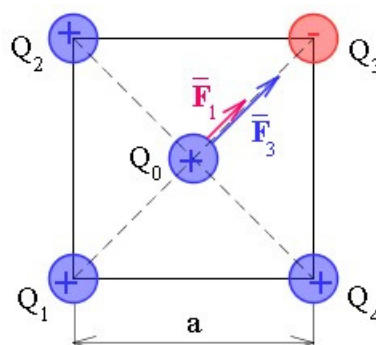
- Polovina úhlopříčky čtverce v obrázku O 3.1.2.-2a je označena jako r . Vypočítejte $r =$?

?

- Náboj Q_2 bude náboj Q_0 odpuzovat silou F_2 , náboj Q_4 bude náboj Q_0 odpuzovat silou F_4 . Tyto síly jsou stejně velké ($Q_2 = Q_4$), ale opačného směru a jejich výslednice je rovna nule jak vidíte na obrázku O 3.1.2.-2b.



O 3.1.2.-2b



O 3.1.2.-2c

Náboj Q_1 bude náboj Q_0 odpuzovat silou F_1 a náboj Q_3 bude náboj Q_0 přitahovat silou F_3 jak můžete vidět na obrázku O 3.1.2.-2c. Výslednice těchto dvou sil má

$$\text{velikost: } F = F_1 + F_3$$

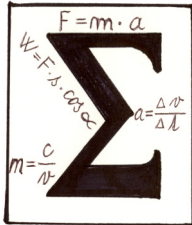
směr : od náboje Q_0 k náboji Q_3

Vyjádřete obecně velikost výslednice F . $F =$?

?

Dosaďte numericky. $F = ?$

?



Elektrostatická síla, která působí mezi dvěma bodovými náboji Q_1 a Q_2 , které jsou v klidu ve vzdálenosti r je

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad \text{V 3.1.2.-1}$$

Elektrostatickou sílu definuje **Coulombův zákon**. Tato síla může být přitažlivá nebo odpuzivá.

Konstanta „ k “ v Coulombově zákonu je

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

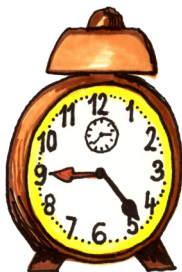
kde ϵ_0 je permitivita vakua.

Pokud uvažujeme více než dva náboje, platí uvedený vztah pro každou dvojici nábojů. Výsledná síla působící na každý náboj je dána vektorovým součtem sil, kterými na náboj působí všechny ostatní přítomné náboje.

3.1.3. Intenzita elektrostatického pole



- chápat elektrické pole jako zprostředkovatele interakce
 - vědět jak intenzita charakterizuje silové působení elektrického pole na náboj
 - vědět, že intenzita je vektor, tj. umět definovat velikost a směr intenzity
 - znát jednotku intenzity
 - umět popsat elektrické pole graficky (elektrické siločáry)
 - umět charakterizovat homogenní a radiální pole
- vypočítat intenzitu bodového náboje
 - charakterizovat elektrický dipól



1,5 hodina



Coulombův zákon. Vektorový součet.



T 3.1.3.-1

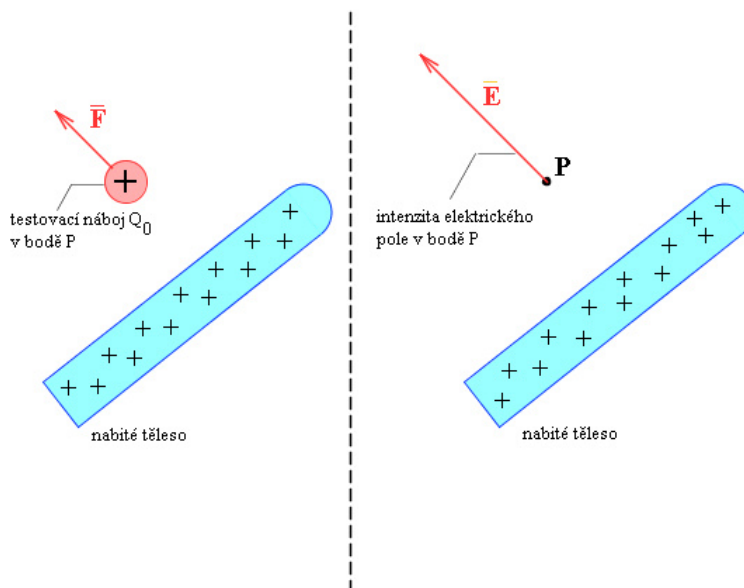
Dva náboje jsou od sebe vzdáleny a přece se přitahují nebo odpuzují. Proč ?

Když Newton formuloval svůj gravitační zákon, přemýšlel i o způsobu přenosu gravitační síly od jednoho tělesa k druhému, ale protože nenašel výklad založený na pozorovatelných faktech, odmítl se nadále o tomto problému vyjadřovat. Traduje se jeho výrok „Hypotheses non fingo“ („Nevymýšlím žádné domněnky“). Coulomb vyšetřoval síly mezi elektrickými náboji a dospěl k zákonu formálně stejnému jako je Newtonův gravitační zákon a stejně jako Newton ani Coulomb nevysvětlil ono „působení na dálku“. Náboj Q_1 působí elektrostatickou silou na náboj Q_2 , který je ve vzdálenosti r od Q_1 . Ale jak ? Tuto otázku můžeme zodpovědět tak, že náboj Q_1 vytváří kolem sebe **elektrické pole**. Elektrické pole považujeme za jednu z forem hmoty. Šíří se prostorem rychlostí světla, tj. přibližně $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Druhý náboj Q_2 interaguje s polem náboje Q_1 ve kterém se nachází. Elektrické pole budeme charakterizovat

- vektorovou veličinou – intenzitou E
- skalární veličinou – potenciálem φ

Na obrázku O 3.1.3.-1a a O 3.1.3.-1b vidíte nabitě těleso (tyč). Existuje kolem tyče, např. v bodě P, elektrické pole? To zjistíme tak, že do bodu P dáme **testovací náboj Q_0 (dohodou kladný)**. Pokud v bodě P je elektrické pole, bude na testovací náboj Q_0 působit elektrostatická síla F , pomocí níž definujeme intenzitu elektrostatického pole v bodě P.

Intenzita elektrického pole E je rovna síle, kterou elektrické pole působí na jednotkový kladný náboj v tomto poli umístěný.



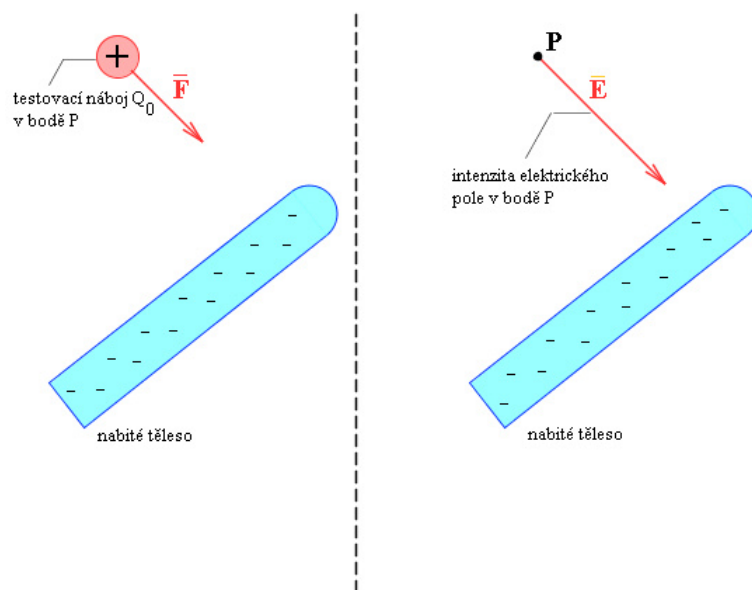
- **Velikost** intenzity je definována vztahem

$$E = \frac{F}{Q_0}$$

V 3.1.3.-1

O 3.1.3.-1a

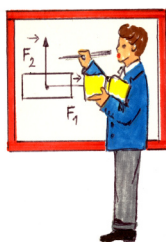
- **Směr** intenzity je totožný se směrem elektrické síly, kterou pole působí na kladný testovací náboj.



O 3.1.3.-1b

Jednotkou elektrické intenzity je newton na coulomb (N.C^{-1}).

Například intenzita uvnitř atomu vodíku je $5 \cdot 10^{11} \text{ N.C}^{-1}$, v blízkosti nabitého plastického hřebenu 10^3 N.C^{-1} , uvnitř měděného vodiče v elektrických obvodech v domácnosti 10^{-2} N.C^{-1}



RU 3.1.3.-1. Vypočítejte velikost intenzity pole v bodě, kde na náboj 200 nC působí síla o velikosti 4 mN .

Řešení:

$$Q = 200 \text{ nC} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ C}, \quad F = 4 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Dále postupujte sami. $E = ?$

?



T 3.1.3.-2

Jakou intenzitu má pole bodového náboje ?

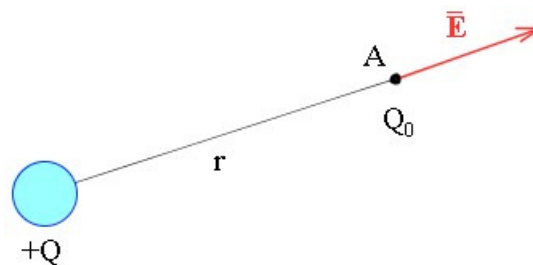
Uvažujme bodový náboj $+Q$ (obrázek O 3.1.3.-2a). Chceme-li určit intenzitu jeho pole v bodě A ve vzdálenosti r , umístíme do bodu A kladný testovací náboj Q_0 . Elektrické pole působí na tento testovací náboj

elektrickou silou podle V 3.1.2.-1

$$F = k \frac{Q \cdot Q_0}{r^2}$$

Dosadíme-li tento vztah do definičního vztahu pro velikost intenzity V 3.1.3.-1 a vykrátíme-li Q_0 dostaneme pro velikost intenzity pole bodového náboje tento výsledek

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad \text{V 3.1.3.-2}$$



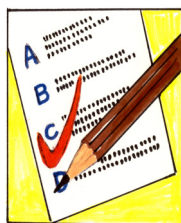
O 3.1.3.-2a

Nyní určíme směr intenzity. Intenzita E je vektor, který

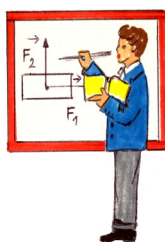
- leží na stejné vektorové přímce jako vektor elektrické síly, kterou na sebe působí oba náboje

- má působiště ve zkoumaném bodě A
 - má směr síly $\mathbf{F}$ působící na kladný testovací náboj (v tomto případě je to síla odpuzivá).
- Pole bodového náboje nazýváme **radiální pole**.

Vztah V 3.1.3.-2 nám umožní vypočítat intenzitu elektrického pole bodového náboje (resp. nabitě koule). Nelze ho tedy použít např. při výpočtu pole nabitě tyče, nabitě desky atd. V těchto případech je nutno použít jiných matematických metod, resp. jiných zákonů.



KO 3.1.3.-1. Změňte si obrázek. O 3.1.3.-2a tak, že uvažovaný náboj bude záporný – Q a nakreslete vektor elektrické intenzity v bodě A.



RU 3.1.3.-2. V řadě předchozích úloh jste se mohli přesvědčit, že jednotka náboje 1 C je velká jednotka. Následující úloha to jen potvrzuje. Předpokládejte osamocený bodový náboj $Q = 1\text{C}$ ve vakuu (přibližně ve vzduchu). V jaké vzdálenosti r od tohoto náboje je velikost intenzity elektrického pole $E = 10^3\text{ N/C}$.

Řešení:

$$Q = 1\text{C}, \quad E = 10^3\text{ N/C}$$

- Ze vztahu V 3.1.3.-2 vypočítejte vzdálenost r . $r =$

?

- Dosad'te numericky $r = ?$

?

Náboj o velikosti 1 C je velký náboj. Velikost intenzity elektrického pole ve vzdálenosti 3 km od náboje $Q = 1\text{C}$ je 10^3 N/C , což může být např. intenzita pole v okolí nabitěho plastického hřebenu.



T 3.1.3.-3

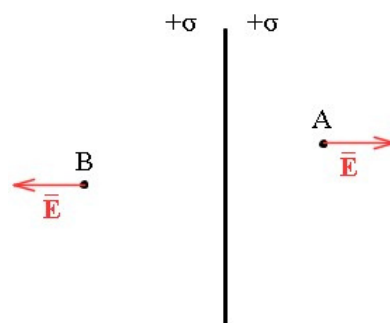
Jakou intenzitu má pole tenké nekonečně velké nabitě roviny ?

Na obrázku O 3.1.3.-3a je nakreslena velmi tenká nekonečně velká vodivá rovina, na kterou byl přenesen kladný náboj. Plošná hustota náboje $+\sigma$ je konstantní. **Plošná hustota náboje** je

definována jako náboj na plošné jednotce, tedy v tomto případě

$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad \text{V 3.1.3-3}$$

a její jednotka je C.m^{-2} .



O 3.1.3.-3a

V blízkosti takto nabitě roviny jsme zvolili dva body : A a B. Pokud bychom vyřešili intenzitu elektrického pole této nabitě roviny, zjistili bychom, že

- vektor intenzity $\mathbf{E}$ je kolmý k rovině (v našem případě má směr od nabitě roviny, tj směr síly působící na kladný testovací náboj v bodě A resp.B)

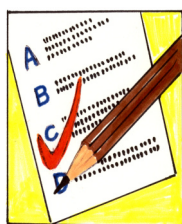
- jeho velikost je

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \quad \text{V 3.1.3.-4}$$

Pokud porovnáte vztahy V 3.1.3.-2 , V 3.1.3.-4 pro pole bodového náboje a pro pole nabité desky zjistíte následující:

- velikost intenzity pole bodového náboje závisí na poloze (vzdálenosti r) zkoumaného bodu, intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti r
 - velikost intenzity pole nabité desky je konstantní, nezávisí na poloze zkoumaného bodu
- Má-li intenzita elektrického pole ve všech jeho bodech stejnou velikost i směr, nazývá se **pole homogenní**. Příkladem může být pole nabité desky.

Tyto závěry pro nabitou rovinu platí za podmínek, které byly uvedeny v úvodu. Je-li deska konečných rozměrů, pak uvedené závěry platí jen ve střední části, kdežto na okrajích dochází k rozptylu pole, vektor intenzity E není všude konstantní.



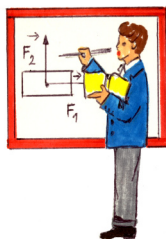
KO 3.1.3.-2. Změňte obrázek O 3.1.3.-3a tak, že na desce bude plošná hustota náboje $-\sigma$. Nakreslete vektor intenzity pole takto nabité roviny v bodech A a B.
?



T 3.1.3.-4

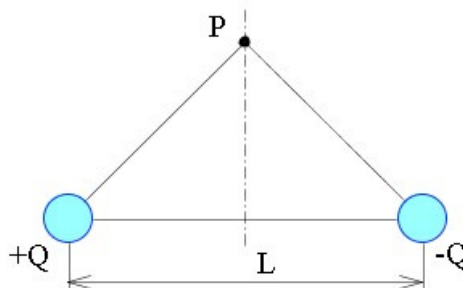
Uvažujme n bodových nábojů $Q_1, Q_2, \dots$. Každý z těchto nábojů vytváří v daném bodě elektrické pole o intenzitě $E_1, E_2, \dots$. Pro intenzitu E výsledného pole platí **princip superpozice**, tj.

$$E = E_1 + E_2 + \dots$$



RU 3.1.3.-3. Uvažujte dva bodové náboje, které mají stejnou velikost ale opačné znaménko : $+Q$, $-Q$. Náboje jsou ve vzdálenosti L . Tyto náboje tvoří **elektrický dipól**. Vzdálenosti L říkáme rameno dipólu, a součin $Q.L$ je moment dipólu. Na ose tohoto dipólu

zvolíme bod P (viz. O 3.1.3.-4a). Nakreslete v bodě P vektor intenzity E pole dipólu.



O 3.1.3.-4a

Řešení:

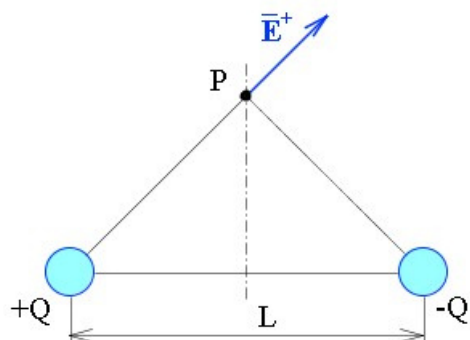
Budeme vycházet z definice intenzity. Intenzita má směr síly, působící na jednotkový kladný testovací náboj. Musíme si ale uvědomit, že v bodě P se budou skládat dvě intenzity:

E^+ od náboje $+Q$

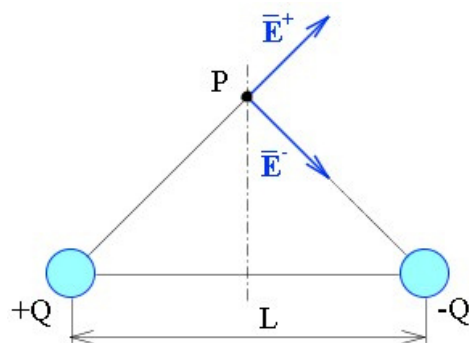
E^- od náboje $-Q$

a hledaná intenzita E bude jejich výslednicí. Nejprve si nakreslíme vektor intenzity E^+ (viz.

O 3.1.3.-4b). Je to vektor, který leží na spojnici náboje $+Q$ a P , působíště má v bodě P a směr od náboje $+Q$.



O 3.1.3.-4b

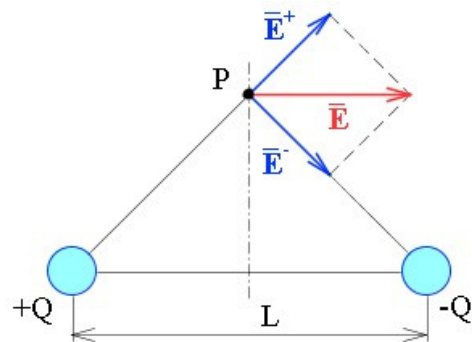


O 3.1.3.-4c

Nyní si nakreslíme vektor intenzity od náboje $-Q$ (viz. O 3.1.3.-4c). Je to vektor E^- . Velikost obou intenzit E^+ a E^- bude v tomto případě stejná protože bod P leží na ose dipólu, ale jejich směr je jiný. Intenzita E^- má směr k náboji $-Q$.

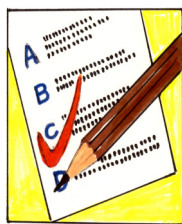
Výslednou intenzitu E dostaneme jako vektorový součet sil E^+ a E^- (viz. O 3.1.3.-4d). Výsledná intenzita je v tomto případě rovnoběžná s ramenem dipólu.

Při řešení této úlohy můžeme postupovat také jinak. Zvolíme si pravouhlý systém souřadnic tak, že počátek je v bodě P , osa x je rovnoběžná s ramenem dipólu a osa y leží v ose dipólu.



O 3.1.3.-4d

Vektor E^+ si rozložíme do dvou složek: E_x^+ a E_y^+ jak vidíte na obrázku O 3.1.3.-5a.



KO 3.1.3.-3. Rozložte podobným způsobem vektor E^- a odpovídejte na otázky.

a) Jaký závěr můžete udělat pro y-ové složky ?

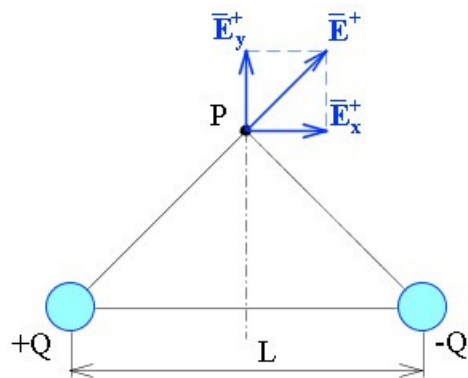
?

b) Jaký závěr můžete udělat pro x-ové složky ?

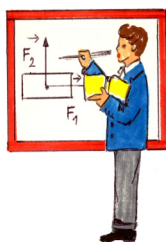
?

c) Jaký směr má výsledná intenzita E ?

?



O 3.1.3.-5a



RU 3.1.3.-4. Najděte výslednou intenzitu elektrického pole mezi nekonečnými velmi tenkými rovnoběžnými vodivými rovinami. Roviny mají stejně velký ale opačný náboj, plošná hustota náboje je na obou rovinách konstantní : $+\sigma$ a $-\sigma$. Řešení úlohy poněkud zjednodušíme a využijeme principu superpozice.

Řešení:

Nakreslíme si rovinu s plošnou hustotou náboje $+\sigma$ (modrá) a rovinu s plošnou hustotou $-\sigma$ (zelenou). Zvolíme si libovolně tři body : A,B,C (viz. O 3.1.3.-6a).

- 1) Zapomeňte na chvíli na záporně nabitou desku a nakreslete vektory $\mathbf{E}^+$ intenzity od kladné desky v bodech A,B,C. Nezapomeňte, že jste v homogenním poli.
- 2) Nyní nakreslete vektory $\mathbf{E}^-$ intenzity od záporné desky v bodech A,B,C.
- 3) Když obě roviny jsou blízko u sebe, výsledné pole vznikne superpozicí (složením) polí obou nabitých rovin.

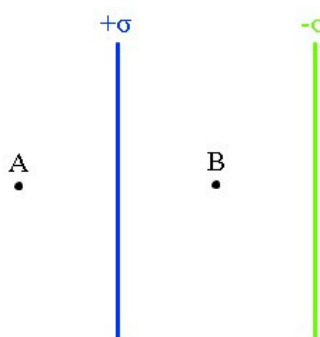
Jaký bude směr a velikost intenzity pole vně rovin a jaký bude směr a velikost intenzity pole mezi rovinami?

Vně rovin se obě pole ruší a intenzita výsledného pole bude rovna nule.

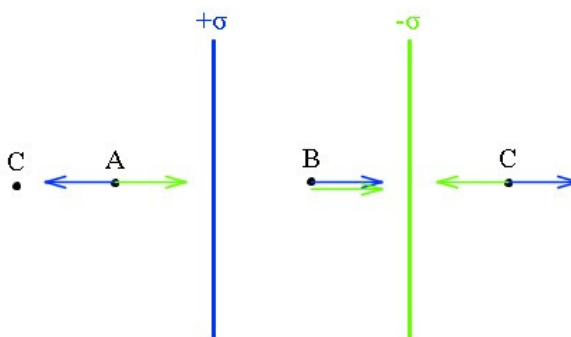
Mezi rovinami se intenzity sčítají a výsledná intenzita bude dvojnásobná než od jedné roviny, tedy podle V 3.1.3.-4 bude mít velikost

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \text{V 3.1.3.-5}$$

Směr výsledné intenzity bude od kladně nabitě roviny k záporné, jak ukazuje O 3.1.3.-6b.



O 3.1.3.-6a



O 3.1.3.-6b

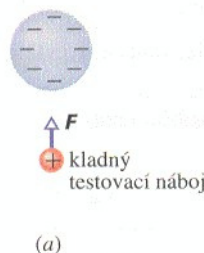


T 3.1.3.-5

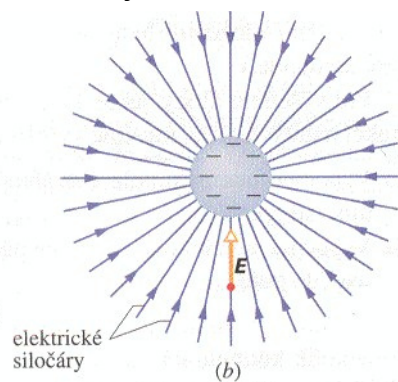
Co je to elektrická siločára?

K názornému zobrazení elektrického pole nám poslouží **elektrické siločáry**. Jsou to myšlené křivky, které nás informují o směru a velikosti intenzity elektrického pole:

- Směr tečny k siločáře v každém bodě určuje vektor (tedy směr) intenzity E .
- Hustota siločar (tj. počet siločar na jednotku plochy kolmé k siločarám) nás informuje o velikosti intenzity E .
- Jsou to spojité čáry, které vycházejí z kladného náboje a končí na záporném náboji.
- Navzájem se nikde neprotínají.
- Jsou kolmé k povrchu elektricky nabitého vodivého tělesa.



O 3.1.3.-7a



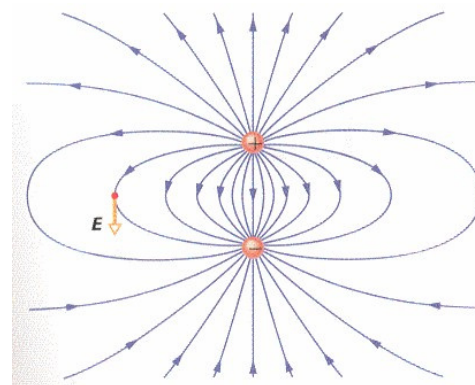
O 3.1.3.-7b

Prohlédněte si pozorně následující obrázky.

- Na obrázku O 3.1.3.-7a vidíte směr elektrostatické síly F působící na kladný testovací náboj v blízkosti záporného bodového náboje (resp. v blízkosti koule s rovnoměrně rozloženým záporným nábojem).

- Na obrázku O 3.1.3.-7b vidíte vektor elektrické intenzity E v místě testovacího náboje a elektrické siločáry. Siločáry končí na záporném náboji.

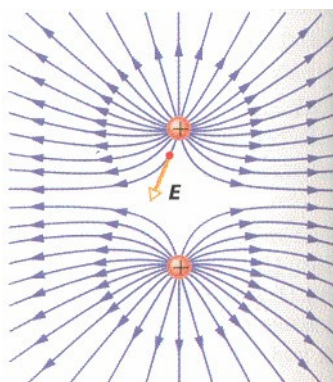
Jejich počátek je v nekonečnu nebo ve vzdálených kladných nábojích.



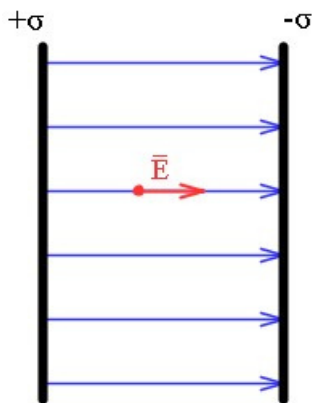
O 3.1.3.-8a

- Na obrázku O 3.1.3.-8a vidíte model siločar a elektrického pole vytvořeného elektrickým dipólem.

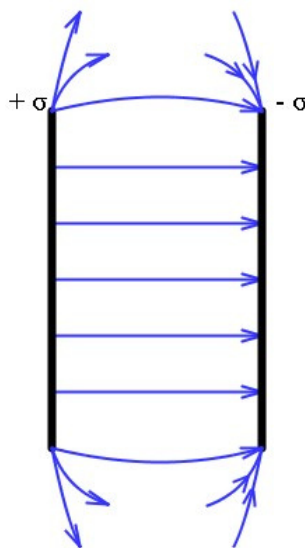
- Na obrázku O 3.1.3.-8b je pomocí siločar znázorněné pole vytvořené dvěma stejně velkými kladnými náboji.



O 3.1.3.-8b

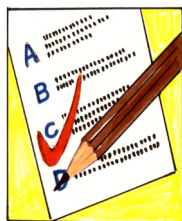


O 3.1.3.-9a



O 3.1.3.-9b

- Obrázek O 3.1.3.-9a ukazuje situaci mezi dvěma rovnoběžnými opačně nabitými rovinami. Víme už, že pole je homogenní, siločáry jsou kolmé na desku a jejich hustota je konstantní.
- Obrázek O 3.1.3.-9b znázorňuje pole mezi opačně nabitými deskami konečných rozměrů.



KO 3.1.3.-4. Jak vypadají siločáry v případě pole kladného bodového náboje?
?

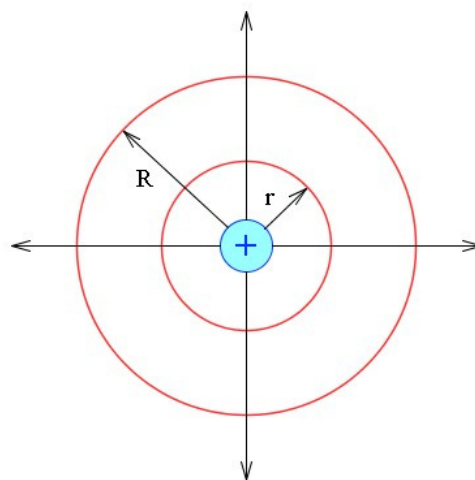
KO 3.1.3.-5. Jednou z vlastností siločar je, že se navzájem neprotínají. Zdůvodněte to.
?

T 3.1.3.-6. Již v předchozím textu bylo řečeno, že hustota siločar nás informuje o velikosti intenzity pole.

Všimněme si ještě jednou pole bodového náboje Q . Na obrázku O 3.1.3.-10 je pole kladného náboje. V poli si zvolíme dvě kulové plochy se středem v náboji.

1. plocha má poloměr r
2. plocha má poloměr $R > r$.

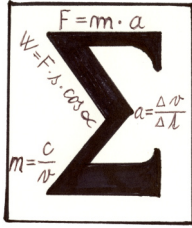
Tyto plochy protíná N siločar, které vycházejí z náboje Q (v našem případě $N = 4$). Hustota siločar na zvolených plochách je
v prvním případě $N/4\pi r^2$
v druhém případě $N/4\pi R^2$



O 3.1.3.-10

KO 3.1.3.-6. Odpovídejte na následující otázky:

- 1) Na které ploše je menší intenzita pole náboje Q ?
?
- 2) Na které ploše je menší hustota siločar?
?



Elektrostatické působení nabitých těles vysvětlujeme tím, že každý náboj budí v prostoru kolem sebe **elektrické pole**. **Intenzita** elektrického pole ***E*** je rovna síle, kterou elektrické pole působí na jednotkový kladný náboj v tomto poli umístěný. Velikost intenzity je dána vztahem

$$E = \frac{F}{Q_0} \quad \text{V 3.1.3.-1}$$

Jednotkou intenzity je $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$.

Intenzita elektrického pole je vektor a proto je definována **velikostí a směrem**. K zobrazení velikosti a směru elektrického pole slouží **elektrické siločáry**. Siločáry začínají v kladných nábojích (nebo v nekonečnu) a končí v záporných nábojích (nebo v nekonečnu).

Velikost intenzity buzené **bodovým nábojem** je

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad \text{V 3.1.3.-2}$$

Pole buzené bodovým nábojem je pole **radiální**.

Intenzita pole nekonečně velké nabitě roviny je

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \quad \text{V 3.1.3.-4}$$

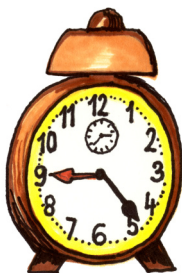
kde σ je plošná hustota náboje. Pole buzené nabitou rovinou je pole **homogenní**. Je to pole, které je charakterizováno konstantní intenzitou ***E* = konst.**

Soustava dvou nábojů, které mají stejnou velikost, ale opačné znaménko tvoří **elektrický dipól**.

3.1.4. Bodový náboj v elektrickém poli



Popsat chování nabitě částice ve vnějším homogenním poli.



1 hodina



Intenzita elektrického pole. Rychlost, zrychlení, pohyb rovnoměrný, rovnoměrně zrychlený, nerovnoměrný. Šikmý vrh a vodorovný vrh v homogenním tíhovém poli Země. Newtonův zákon síly.



T 3.1.4.-1

Jak se bude chovat nabitá částice, která se nachází ve vnějším elektrickém poli?

Vnějším polem rozumíme pole, které je buzeno jinými náboji a nezahrnuje vlastní pole zkoumané částice. Prohlédněte si znovu text

T 3.1.3.-1.

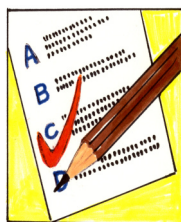
Jestliže se částice Q nachází v elektrickém poli intenzity E , působí pole na částici silou F , pro kterou platí

$$F = QE$$

V 3.1.4.-1

Jestliže se v poli nachází částice, jejíž náboj Q je kladný, působící síla pole F má směr souhlasný s intenzitou E .

Jestliže se v poli nachází částice, jejíž náboj Q je záporný, působící síla pole F má směr opačný než intenzita E .



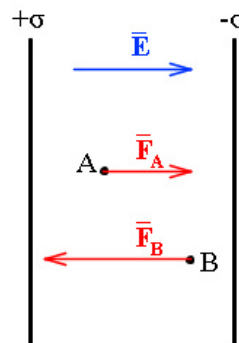
KO 3.1.4.-1. Na obrázku O 3.1.4.-1 vidíte homogenní pole intenzity E a v něm dvě nabité částice A a B. Pole působí na částice silami F_A a F_B .

Z obrázku je patrné, že

- částice A je kladná a částice B je záporná
- částice A je záporná a částice B je kladná

?

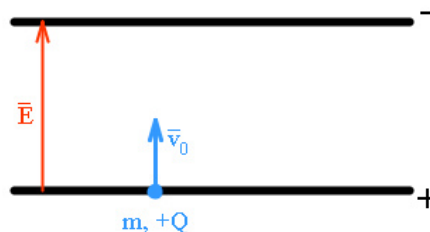
O 3.1.4.-1



KO 3.1.4.-2. Do homogenního elektrického pole vstupuje kladně nabitá částice s počáteční rychlostí v_0 ve směru siločar (obrázek O 3.1.4.-2). Hmotnost částice je m a její náboj je $+Q$. Tíhovou sílu částice (vzhledem k velikosti elektrické síly) zanedbáme.

Odpovídejte na dané otázky:

- Jak velkou silou působí pole na částici?
?
- Je tato síla konstantní co do směru i velikosti?
?
- Jakým pohybem se bude částice pohybovat a po jaké trajektorii?



O 3.1.4.-2

?

4) Elektrická síla velikosti $Q \cdot E$ uděluje částici zrychlení. Použitím druhého Newtonova zákona vyjádřete velikost tohoto zrychlení $a =$

?

5) Vyjádřete velikost rychlosti částice, kterou bude mít po t sekundách pohybu $v =$

?

6) Jakou dráhu urazí částice za t sekund?

?

7) Uvažujte následující variantu úlohy. Částice i elektrické pole zůstanou stejné. Jak musíte částici vpustit do pole, aby se v něm pohybovala přímočaře rovnoměrným zpomaleným pohybem?

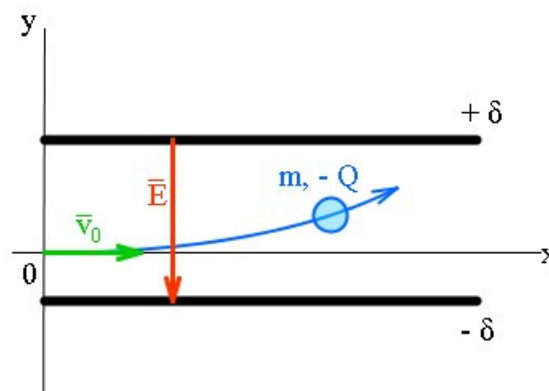
?



T 3.1.4.-2

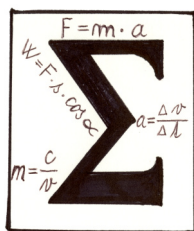
Vodorovný vrh v elektrickém poli ?

Na obrázku O 3.1.4.-3 vidíte záporně nabitou částici, která je vpuštěna do homogenního pole tak, že vektor rychlosti $\vec{v}_0$ je kolmý na vektor intenzity $\vec{E}$. Protože částice je nabitá záporně a intenzita elektrického pole směřuje dolů, působí na částici směrem vzhůru elektrostatická síla o velikosti $Q \cdot E$. Částice je vychylována od svého původního směru, její trajektorie je parabola (resp. její část).



O 3.1.4.-3

Na tomto principu mohou pracovat inkoustové tiskárny. Pokud intenzita pole, hmotnost kapek a jejich počáteční rychlost jsou konstantní, potom místo kam kapka na papíře dopadne je závislé jen na náboji kapky. Vstupním signálem z počítače určíme náboj předávaný každé kapce a tím polohu na papíře, kam kapka dopadne. K vytvoření jednoho znaku je potřeba asi 100 kapek.



Jestliže se v elektrickém poli intenzity E nachází částice, která má náboj Q a hmotnost m , působí na ni elektrické pole silou

$$F = QE \quad \text{V 3.1.4.-1}$$

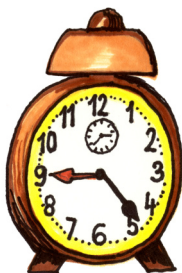
Homogenní elektrické pole působí na částici konstantní silou a částice se v poli pohybuje rovnoměrně zrychleně (zpomaleně).

3.1.5. Elektrický potenciál



- vysvětlit práci, kterou konají síly pole při přemísťování náboje
- vědět jak velikost této práce charakterizuje elektrické pole
- umět definovat potenciál elektrického pole φ_A

- znát jednotku potenciálu
- vysvětlit, co je ekvipotenciální hladina



30 minut



Definice práce jako skalární veličiny. Jednotka práce.



T 3.1.5.-1

Působí-li síla po dráze, koná práci.

Sledujte obrázek O 3.1.5.-1.

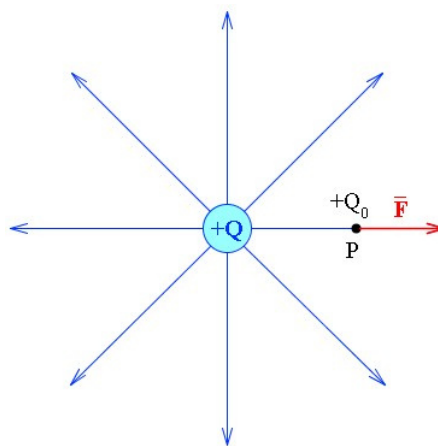
Uvažujme bodový náboj $+Q$. Tento náboj působí elektrickou silou na každý další náboj, který je v jeho poli. Do pole náboje $+Q$ umístíme kladný testovací náboj $+Q_0$. Je-li tento testovací náboj pohyblivý a je-li v poli přemísťován, konají síly pole práci. Podle Coulombova zákona (V 3.1.2.-1) klesá velikost elektrické síly se čtvercem vzdálenosti obou nábojů a bude rovna nule v nekonečnu. V praxi stačí brát vzdálenost, v níž je síla již zanedbatelná.

Jestliže je testovací náboj $+Q_0$ přemístěn z bodu P do nekonečna (prakticky do velké vzdálenosti), vykonají síly pole práci W . Velikost této práce bude záviset na velikosti testovacího náboje. Čím větší bude velikost testovacího náboje, tím větší práci musí elektrické síly pole vykonat (za jinak konstantních podmínek). Práce W tedy necharakterizuje elektrické pole jednoznačně. Avšak práce vztažená na jednotkový náboj, má jednoznačnou hodnotu.

Práci připadající na jednotkový náboj můžeme zapsat podílem W/Q_0 . Je nezávislá na náboji Q_0 částice, kterou jsme k testování použili a charakterizuje pouze elektrické pole, které v bodě P vyšetřujeme. Nazýváme ji **elektrický potenciál φ** .

$$\varphi = \frac{W}{Q_0}$$

V 3.1.5.-1



O 3.1.5.-1

Jednotkou potenciálu je $J \cdot C^{-1}$. Tato jednotka se nazývá volt (značka V). Potenciál je skalární veličina, je tedy definován jen svou velikostí.

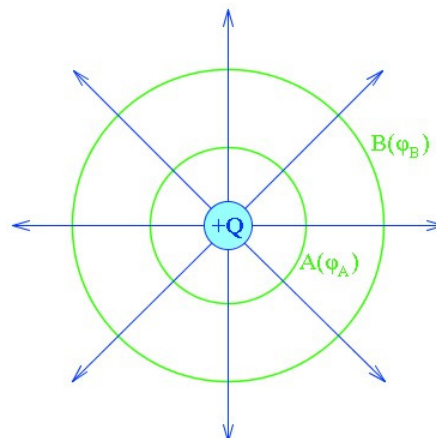
Elektrický potenciál v daném bodě je roven práci, kterou vykonají síly pole při přemístění kladného jednotkového náboje z daného místa pole do místa, kde je velikost síly (a taky intenzity) pole rovna nule.

Absolutní hodnota potenciálu v bodě není pro praxi důležitá a proto lze místo nulového potenciálu volit zcela libovolně. V experimentální a technické praxi je obvyklé volit za místo nulového potenciálu zemi a k ní vztahovat potenciály všech jiných bodů.

Body, ve kterých má elektrický potenciál stejnou hodnotu, tvoří **ekvipotenciální hladinu**.

Například u pole bodového náboje nebo náboje rovnoměrně rozmístěného na kulovém vodiči tvoří ekvipotenciální hladiny soustředné kulové plochy (viz. O 3.1.5.-2). Elektrický potenciál φ na ekvipotenciální ploše o poloměru r je dán vztahem

$$\varphi = k \frac{Q}{r} \quad \text{V 3.1.5.-2}$$

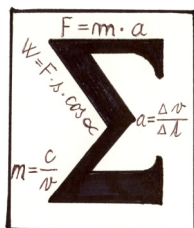


O 3.1.5.-2

Ve všech bodech, které leží na ploše A je stejný potenciál φ_A , na ploše B je potenciál φ_B atd. Elektrické pole lze tedy znázornit dvěma způsoby:

- elektrickými siločarami (definují směr a velikost intenzity pole),
- ekvipotenciálními plochami (definují velikost potenciálu).

Elektrické siločáry jsou vždy kolmé k ekvipotenciálním hladinám.



Kromě vektorové veličiny - intenzity - můžeme elektrické pole charakterizovat také skalární veličinou, zvanou **elektrický potenciál**.

Elektrický potenciál v daném bodě je roven práci, kterou vykonají síly pole při přemístění kladného jednotkového náboje z daného místa pole do místa, kde je velikost síly (a taky intenzity) pole rovna nule.

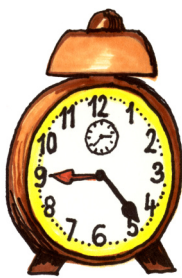
$$\varphi = \frac{W}{Q_0} \quad \text{V 3.1.5.-1}$$

Všechny body na **ekvipotenciální ploše** mají stejný elektrický potenciál. Potenciál pole vyvolaného soustavou nábojů je součtem potenciálů dílčích polí. Jednotkou potenciálu je **volt (V)**.

3.1.6. Elektrické napětí



- umět definovat elektrické napětí U a jeho souvislost s potenciálem
- umět odvodit vztah mezi potenciálem (resp.napětím) a intenzitou v homogenním elektrostatickém poli
- popsat průběh potenciálu v homogenním poli



2 hodiny



Definice práce jako skalární veličiny. Jednotka práce.



T 3.1.6.-1

V elektrickém poli náboje $+Q$ si zvolíme dva body A,B (viz. O 3.1.6.-1). Práci, kterou vykonají síly pole k přemístění testovacího náboje $+Q_0$ z bodu A do nekonečna označíme W_A a práci k přemístění $+Q_0$ z bodu B do nekonečna označíme W_B .

Jak velkou práci vykonají síly pole při přemístění náboje $+Q_0$ z bodu A do bodu B?

$$W = W_A - W_B$$

Celou rovnici vydělíme Q_0 a dostaneme

$$\frac{W}{Q_0} = \frac{W_A}{Q_0} - \frac{W_B}{Q_0} \quad \text{V 3.1.6.-1}$$

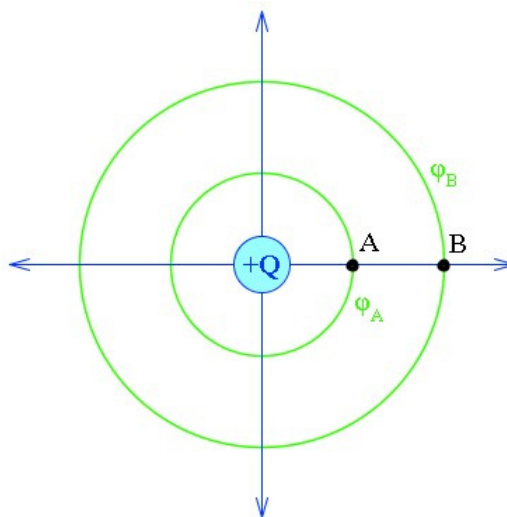
Výraz W/Q_0 představuje práci vykonanou elektrickou silou při přemístění kladného náboje jednotkové velikosti z bodu A do bodu B a definuje **elektrické napětí U mezi oběma body**.

Tedy

$$U = \frac{W}{Q_0} \quad \text{V 3.1.6.-2}$$

Použijeme-li definici V 3.1.5.-1, můžeme rovnici V 3.1.6.-1 psát ve tvaru :

$$U = \varphi_A - \varphi_B \quad \text{V 3.1.6.-3}$$



O 3.1.6.-1

Napětí mezi dvěma body elektrického pole je rovno práci vykonané elektrickou silou při přemístění kladného náboje jednotkové velikosti z jednoho bodu do druhého a je rovno rozdílu potenciálů mezi těmito body.

Jednotka elektrického napětí je volt (V). Mezi dvěma body v elektrickém poli je napětí 1 volt tehdy, když se při přenosu náboje 1 coulomb vykoná práce 1 joul.

Věnujme se ještě chvíli vztahu V 3.1.6.-2 a V 3.1.6.-3. Z těchto vztahů plyne, že

$$W = Q_0 \cdot U = Q_0(\varphi_A - \varphi_B)$$

Práce elektrických sil W závisí na napětí, resp. na rozdílu potenciálů a ne na volbě místa s nulovým potenciálem.

- Práce elektrických sil W závisí na napětí, resp. na rozdílu potenciálů v bodech A a B a nezávisí na volbě trajektorie, po které je náboj z bodu A do B přemísťován.

- Jednotku práce (a energie) v soustavě SI už znáte. Je to joule (J).

Někdy je výhodné použít pro práci nebo energii jinou jednotku – **elektronvolt (eV)**.

Je to práce potřebná k přemístění elementárního náboje e (elektronu, protonu) z jednoho bodu elektrického pole do druhého mezi nimiž je napětí 1 V. Tato práce je rovna energii, kterou přemísťovaný elementární náboj získá (nebo ztratí). Jaký je vztah mezi jednotkami J a eV?

Podle V 3.1.6.-2 platí:

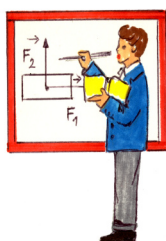
$$W = Q \cdot U = e \cdot U$$

po dosazení dostaneme:

$$W = e \cdot 1\text{V} = 1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C} \cdot 1\text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C} \cdot \text{V}$$

protože $\text{C} \cdot \text{V} = \text{J}$, můžeme psát :

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$$



RU 3.1.6.-1. Napětí mezi Zemí a mrakem při bouřce je $1,2 \cdot 10^9\text{ V}$. Jak velkou práci v eV představuje přesun elektronu mezi Zemí a mrakem?

Řešení:

$$U = 1,2 \cdot 10^9\text{ V} \quad Q = e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$$

Podle definice V 3.1.6.-2 můžeme psát $W = e \cdot U$

$$\text{Dosadíme : } W = e \cdot 1,2 \cdot 10^9\text{ V} \Rightarrow W = 1,2 \cdot 10^9\text{ eV}$$

Pokud chceme práci vyjádřit v joulech dosazujeme takto:

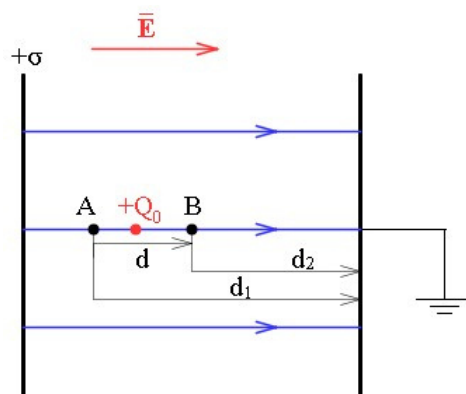
$$W = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C} \cdot 1,2 \cdot 10^9\text{ V} \Rightarrow W = 1,92 \cdot 10^{-10}\text{ J}$$

RU 3.1.6.-2. Na obrázku O 3.1.6.-2 vidíme dva body A,B v homogenním elektrickém poli. Pole je vytvořeno kladně nabitou rovinou.

Oba body leží na jedné siločáře, jejich vzájemná vzdálenost je d .

1. Určete práci, kterou vykonají síly pole při přemístění kladného testovacího náboje Q_0 z bodu A do místa nulového potenciálu. $W_A = ?$
2. Určete potenciál v bodě A. $\varphi_A = ?$
3. Určete práci, kterou vykonají síly pole při přemístění kladného testovacího náboje Q_0 z bodu B do místa nulového potenciálu. $W_B = ?$
4. Určete potenciál v bodě B. $\varphi_B = ?$
5. Určete potenciálový rozdíl $\varphi_A - \varphi_B = ?$

O 3.1.6.-2



Řešení:

1) Kladně nabitá deska vytváří homogenní pole. Intenzita E má konstantní velikost a směr (od desky). Ve vzdálenosti d_1 od bodu A umístíme uzemněnou desku. Potenciál uzemněné desky je nulový. Vzdálenost bodu B od uzemněné desky označíme d_2 .

Z mechaniky víme, že práce vykonaná konstantní silou F , působící na částici a vyvolávající posunutí d_1 částice, je rovna

$$W_A = F \cdot d_1 \cos \alpha \quad \text{V 3.1.6.-4}$$

pokud sílu F vyjádříme z rovnice V 3.1.4.-1, potom

$$W_A = E \cdot Q_0 \cdot d_1 \cos \alpha \quad \text{V 3.1.6.-5}$$

kde α je úhel mezi směry vektorů E a d_1 . V našem případě je $\alpha = 0^\circ$, $\cos 0^\circ = 1$ a proto

$$W_A = E \cdot Q_0 \cdot d_1$$

2)

Z definice potenciálu V 3.1.5.-1 plyne, že

$$\varphi_A = E \cdot d_1 \quad \text{V 3.1.6.-6}$$

3)

V případě bodu B postupujeme stejně, tedy

$$W_A = E \cdot Q_0 \cdot d_2$$

4)

$$\varphi_B = E \cdot d_2 \quad \text{V 3.1.6.-7}$$

5)

Potenciálový rozdíl $\varphi_A - \varphi_B$ (nebo také napětí U mezi body A,B) je

$$\varphi_A - \varphi_B = U = E(d_1 - d_2)$$

$$U = E \cdot d \quad \text{V 3.1.6.-8}$$

Závěr:

- Z výsledků

$$\varphi_A = E \cdot d_1 \quad \varphi_B = E \cdot d_2$$

plyne, že potenciály φ_A a φ_B v bodech A a B mohou nabýt různých hodnot v závislosti na volbě místa nulového potenciálu a proto pro praxi nemají význam.

- Z výsledku

$$U = E \cdot d$$

plyne, že napětí U nezávisí na volbě místa nulového potenciálu.

- Porovnejte velikosti obou potenciálů $\varphi_A = E \cdot d_1$ a $\varphi_B = E \cdot d_2$

Protože intenzita E je konstanta a $d_1 > d_2$, musí pro velikost obou potenciálů platit :

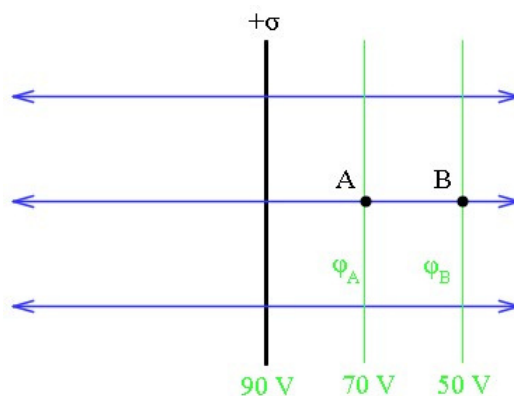
$\varphi_A > \varphi_B$. Tento výsledek potvrzuje, že

elektrický potenciál klesá ve směru elektrických siločar

Potenciál pole kladného náboje (v našem případě kladně nabitá deska) je kladný, $\varphi_A > 0$, $\varphi_B > 0$ jak vidíte na obrázku O 3.1.6.-3.

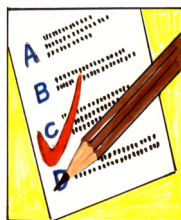
- Z rovnice $U = E \cdot d$ plyne také jiná jednotka pro intenzitu : volt na metr (V/m)

Na závěr vás chci znovu upozornit! Postup, který jsme volili v předešlé úloze je možno použít jen

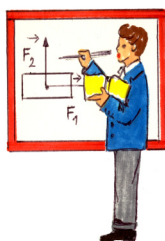


O 3.1.6.-3

v případě homogenního pole. V takovém poli je intenzita E konstantní a tedy i síla, konající práci, je konstantní. V případě, že tomu tak není (např. v poli bodového náboje) musíme volit jiný matematický přístup.



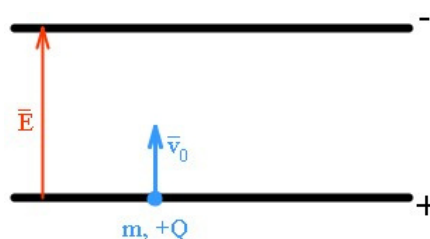
KO 3.1.6.-1. Podívejte se ještě jednou na vztah $\varphi_A = E \cdot d_1$. Připomínám, že intenzita E je konstantní. Jaký tvar mají ekvipotenciální hladiny u nabitě desky?



RU 3.1.6.-3. Částice má hmotnost 4 g a náboj 2 C. Částice projde potenciálním rozdílem 10^5 V. Vypočítejte rychlost, kterou částice získá.

Tuto úlohu si prostudujte **velmi pečlivě**. S jejím obecným řešením se

budeme setkávat velmi často.



O 3.1.4.-2

Řešení: $m = 4 \text{ g} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$, $Q = 2 \text{ C}$, $U = 10^5 \text{ V}$

Uvažujme částici s nábojem $+Q$ (O 3.1.4.-2) která vnikne do homogenního elektrického pole. Mezi deskami je napětí U . Částice se bude pod vlivem síly elektrického pole pohybovat od kladné desky k záporné pohybem rovnoměrně zrychleným, její rychlost se bude zvětšovat.

Ze vztahu V 3.1.6.-2 plyne, že síly pole vykonají práci

$$W = Q \cdot U$$

a částice získá kinetickou energii

$$E_k = m \cdot v^2 / 2$$

porovnáním obou vztahů dostaneme

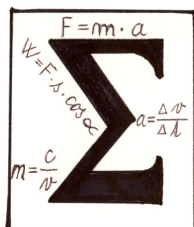
$$Q \cdot U = m \cdot v^2 / 2$$

a odtud pro rychlost částice platí

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot U}{m}} \quad \text{V 3.1.6.-9}$$

Dosadíme : $v = (2 \cdot 2 \cdot 10^5 / 4 \cdot 10^{-3})^{0,5} \text{ m/s} = 10^4 \text{ m/s}$

Částice získá rychlost 10^4 m/s .



Práce, kterou vykonají síly pole při přemístění kladného jednotkového náboje z jednoho bodu pole do druhého bodu pole je **napětí U** .

$$U = \frac{W}{Q_0}$$

V 3.1.6.-2

Jednotka napětí je **volt (V)**. Z rovnice V 3.1.6.-2 můžeme definovat jednotku energie **elektronvolt (eV)**.

Pro napětí v homogenním elektrickém poli intenzity E lze snadno odvodit vztah

$$U = E \cdot d$$

V 3.1.6.-8

kde d je vzdálenost dvou ekvipotenciálních hladin, mezi nimiž je napětí U . Rovnice V 3.1.6.-8 definuje jednotku intenzity jako V/m.

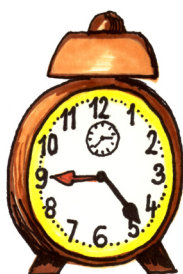
Pokud částice hmotnosti m a náboje Q projde potenciálním rozdílem U , získá kinetickou energii E_k pro kterou platí:

$$Q.U = m.v^2 / 2$$

3.1.7. Vodič a izolant v elektrickém poli



- vysvětlit princip elektrostatické indukce
- vysvětlit co je polarizace dielektrika
- umět vysvětlit fyzikální smysl relativní permitivity
- popsat chování vodiče a izolantu v elektrickém poli



45 minut



Zopakujte si chování elektrického dipólu v homogenním elektrickém poli.



T 3.1.7.-1

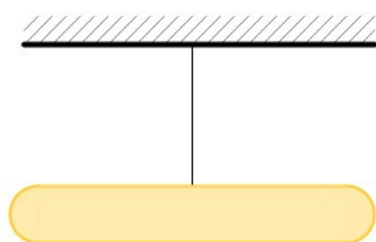
Co probíhá ve vodiči, vložíme-li ho do vnějšího elektrického pole?

Sledujte obrázek O 3.1.7.-1a

a) Neutrální měděná tyč (vodič) je elektricky izolována od okolí zavěšením na nevodivé vlákno. Tyč obsahuje volné elektrony, jejichž hustota je v celé tyči víceméně konstantní.

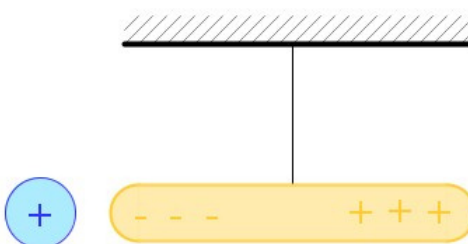
b) K jednomu konci měděné tyče přiblížíme kladně nabitou skleněnou tyč (O 3.1.7.-1b). Volné elektrony v mědi jsou kladným nábojem skla přitahovány.

Na bližším konci měděné tyče je nyní nadbytek elektronů, tedy převažuje záporný náboj, na vzdálenějším konci měděné tyče je nedostatek elektronů, tedy převládá kladný náboj. Ačkoli měděná tyč jako celek zůstává elektricky neutrální, říkáme, že má **indukovaný náboj** a tento jev se nazývá **elektrostatická indukce**. Toto rozmístění náboje v kovovém vodiči je dočasné, po oddálení zeledrované skleněné tyče zaniká.

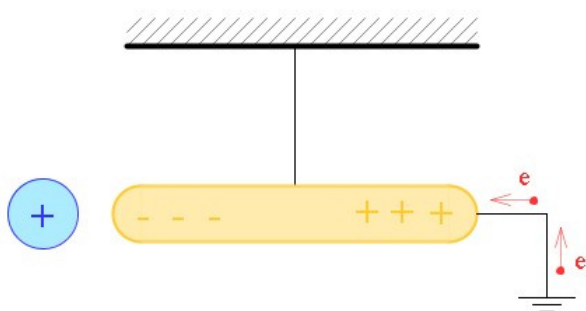


neutrální měděná tyč

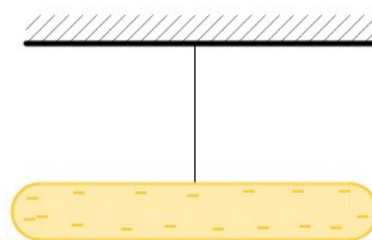
O 3.1.7.-1a



O 3.1.7.-1b



O 3.1.7.-1c



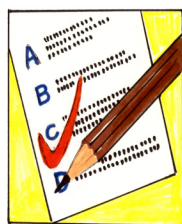
O 3.1.7.-7d

c) Uzemníme-li nyní měděnou tyč, pak indukovaný náboj na vzdálenějším konci (v našem případě kladný) se zneutralizuje. Elektrony přejdou ze země na tyč (O 3.1.7.-1c)

d) Odstraníme-li uzemnění a následně také nabitou skleněnou tyč, zůstane měděná tyč trvale nabitá nábojem, který se na ni indukoval působením vnějšího pole (v našem případě se měděná tyč trvale nabíla záporně). Tento záporný náboj, který je roven co do velikosti náboji indukujícímu, se rozloží po celém povrchu tyče (O 3.1.7.-7d)

Závěr:

- Při elektrostatické indukci vznikají na vodiči náboje opačného znaménka, které jsou rovny náboji indukujícímu.
- Elektrostatickou indukci lze nabít vodič trvale, a to vždy nábojem nesouhlasným k náboji indukujícího tělesa.
- U elektricky nabitého vodiče se rozmísťuje elektrický náboj jen na jeho povrchu, v případě dutého vodiče na vnějším povrchu. Intenzita elektrického pole uvnitř vodiče je nulová.



KO 3.1.7.-1. Zopakujte si celou úvahu ještě jednou ale s následující změnou. K jednomu konci měděné tyče přiblížíme záporně nabitou ebonitovou tyč. Jakým trvalým (tzv.vázaným nábojem) se měděná tyč nabije?
?

KO 3.1.7.-2. Uvažujte vodivou kouli o poloměru R , která je nabitá nábojem Q . Odpovídejte na dané otázky.

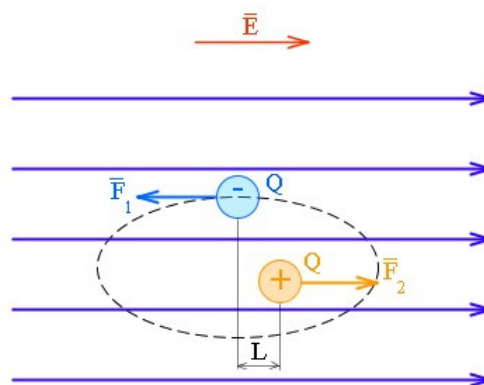
- 1) Jak velká je intenzita elektrického pole na povrchu koule ? $E = ?$
?
- 2) Jak velká je intenzita elektrického pole ve vzdálenosti x ($x > R$) od středu koule ?
 $E = ?$
?
- 3) Jak velká je intenzita elektrického pole ve vzdálenosti y ($y < R$) od středu koule ?
 $E = ?$
?



T 3.1.7.-2

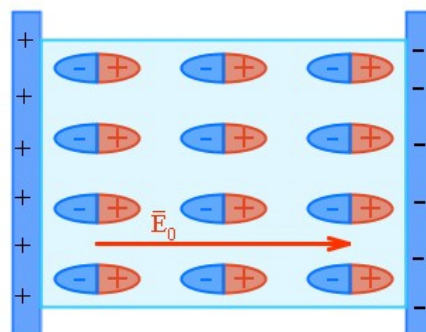
Co probíhá v dielektriku z hlediska atomové a molekulové struktury, vložíme-li ho do vnějšího elektrického pole?

Atom se navenek jeví elektricky neutrální. Vlivem vnějšího elektrického pole se kladné atomové jádro posune ve směru pole a obvodové elektrony se posunou právě opačným směrem. Atom se jeví jako elektrický dipól o nábojích $+Q$ a $-Q$, posunutých vzájemně o délku L (viz RU 3.1.3.-3). Uvedený jev se nazývá **polarizace**. Polarizaci u atomu vidíte na obrázku O 3.1.7.-2.



O 3.1.7.-2

K polarizaci dochází i u molekul. Je-li molekula vystavena účinkům vnějšího elektrického pole, nastane v ní posunutí elektrických nábojů. Kladné náboje molekuly se posunou ve směru pole, záporné ve směru opačném, čímž se vytvoří elektrický dipól. Na obrázku O 3.1.7.-3 vidíte dielektrikum, které je umístěné v homogenním elektrickém poli. Na povrchových plochách dielektrika jsou opačné elektrické náboje, uvnitř dielektrika se náboje vzájemně vyruší. **Dielektrikum je polarizováno.** Náboje na povrchových plochách dielektrika zmizí, odstraníme-li vnější elektrické pole.



O 3.1.7.-3

Umístíme-li vodič a izolant do vnějšího elektrického pole, potom **rozdl mezi vodičem a izolantem můžeme popsat takto:**

V elektrickém poli nastane u **vodiče** pohyb náboje v celém rozsahu vodiče. Rozpůlíme-li vodič, zůstane jedna část kladně nabitá, druhá záporně. Naproti tomu v **izolantu** nastane v elektrickém poli posuv nábojů v molekulách tak, že náboje kladné se posunou ve směru intenzity vnějšího pole, náboje záporné se posunou opačným směrem. Uvnitř izolantu je vedle sebe kladný náboj jedné molekuly a záporný náboj molekuly sousední, takže se jejich účinek ruší. Jen na mezních plochách izolantu jsou na jedné straně vedle sebe náboje kladné, na druhé náboje záporné.

Uvnitř vodiče není elektrické pole, intenzita elektrického pole ve vodiči $E = 0 \text{ N/C}$.

V dielektriku má intenzita elektrického pole velikost E' a je opačného směru než intenzita vnějšího pole.

T 3.1.7.-3

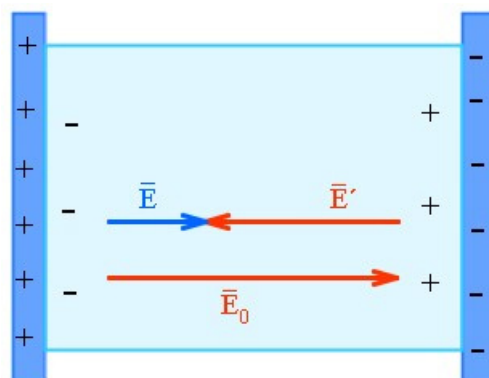
Na obrázku O 3.1.7.-4 vidíte vektor intenzity E_0 vnějšího pole. Polarizací dielektrika vzniká elektrické pole intenzity E' . Intenzita výsledného pole uvnitř dielektrika $E = E_0 + E'$ má směr pole E_0 avšak menší velikost $E = E_0 - E'$.

Intenzita výsledného pole je vždy menší než intenzita pole, které polarizaci vyvolalo. Kolikrát se intenzita výsledného pole zmenší?

To závisí na jakosti dielektrika. **Intenzita výsledného pole se zmenší ϵ_r krát**, tedy $E_0/E = \epsilon_r$.

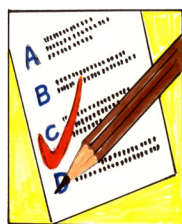
O 3.1.7.-4

Dielektrikum lze charakterizovat veličinou ϵ_r , kterou nazýváme **relativní permitivita**. Pro vakuum je $\epsilon_r = 1$, pro vzduch je nepatrně vyšší, pro vodu je kolem 80, pro papír 3,5.



V prostoru zcela vyplněném dielektrikem s relativní permitivitou ϵ_r platí všechny rovnice elektrostatiky vakua, pokud permitivitu vakua ϵ_0 nahradíme součinem $\epsilon_r \cdot \epsilon_0$.

Jinou veličinou, která charakterizuje dielektrikum, je **dielektrická pevnost**. Je to maximální intenzita elektrického pole, při níž ještě nedojde k elektrickému průrazu dielektrika. Při průrazu se vytvoří v dielektriku vodivá dráha, dielektrikum ztrácí své izolační vlastnosti, poškodí se. Např. pro vzduch je $E_{\max}$ 3 kV/mm, pro polystyren je 24 kV/mm.



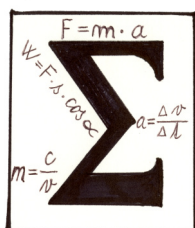
KO 3.1.7.-3. Zopakujte si dosud uvedené rovnice elektrostatiky a запиšte je tak, aby platily v případě, že prostor je zcela vyplněn dielektrikem s relativní permitivitou ϵ_r .

1) Coulombův zákon (V 3.1.2.-1)
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q_1Q_2}{r^2}$$

Dále už pokračujte sami

2) Intenzita pole bodového náboje (V 3.1.3.-2) $E =$

3) Intenzita pole mezi nabitými deskami (V 3.1.3.-5) $E =$



Při **elektrostatické indukci** vznikají na vodiči náboje opačného znaménka, které jsou rovny náboji indukujícímu. Elektrostatickou indukci lze nabít vodič trvale, a to nábojem nesouhlasným k náboji indukujícího tělesa. Elektrický náboj u nabitého vodiče se rozmisťuje jen na jeho povrchu.

Umístíme-li **vodič** do vnějšího elektrického pole, nastane v něm pohyb náboje v celém jeho rozsahu. Naproti tomu v **izolantu** nastane v elektrickém poli posuv nábojů v molekulách tak, že na povrchových plochách dielektrika jsou opačné elektrické náboje a uvnitř dielektrika se náboje vzájemně vyruší. Hovoříme o **polarizaci dielektrika**. Dielektrikum charakterizujeme **relativní permitivitou ϵ_r** . Přítomnost dielektrika má za následek snížení intenzity vnějšího pole.

3.1.8. Kapacita



- vysvětlit co tvoří kondenzátor
- umět definovat kapacitu kondenzátoru
- znát jednotku kapacity
- vysvětlit kvalitativně jak se kondenzátor nabíjí
- umět odvodit kapacitu deskového kondenzátoru
- umět charakterizovat sériové a paralelní spojování kondenzátorů
- vysvětlit co platí v obou případech zapojení o výsledné kapacitě, napětí a náboji



2 hodiny



Zopakujte si pojmy: napětí U , intenzita elektrického pole E , vztah mezi intenzitou E a napětím U v případě homogenního pole, plošná hustota náboje.



T 3.1.8.-0

V radiovém či televizním přijímači, ve vysavači, ve fotoblesku, v PC, v medicíně atd. se můžete setkat s elektrickou součástíkou - kondenzátorem. V kondenzátoru

se může hromadit elektrický náboj a tím se v něm vytváří elektrické pole.

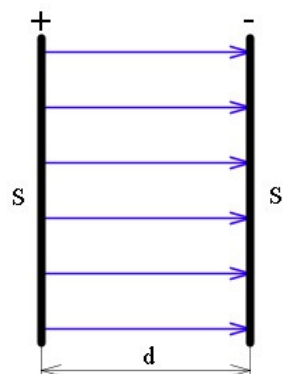
Kondenzátor tak může sloužit k uchování energie tohoto pole.

T 3.1.8.-1

Co je to kondenzátor a jeho kapacita ?

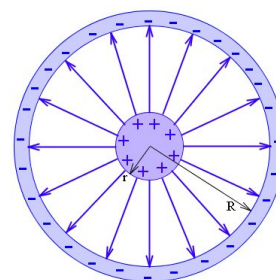
Kondenzátor je tvořen dvěma vodiči, zvané **elektrody**, které jsou blízko u sebe, ale jsou od sebe elektricky izolovány.

Deskový kondenzátor tvoří dva rovnoběžné rovinné vodiče ve vzdálenosti d , každý o obsahu S (O 3.1.8.-1).



O 3.1.8.-1

Válcový kondenzátor, jehož příčný řez vidíte na obrázku O 3.1.8.-2 má délku L , jeho vnitřní elektroda má tvar válce o poloměru r a vnější elektrodu tvoří souosý dutý válec o vnitřním poloměru R . Obrázek 3.1.8.-2 může posloužit také jako příčný řez vedený středem **kulového kondenzátoru**, který se skládá z plné koule o poloměru r a s ní soustředné kulové vrstvy o vnitřním poloměru R . Je-li kondenzátor nabitý, mají jeho elektrody stejně velké náboje, ale opačných znamének $+Q$ a $-Q$. Mluvíme-li o náboji na kondenzátoru, máme na mysli velikost náboje jedné z jeho elektrod.



O 3.1.8.-2

Mezi oběma elektrodami nabitého kondenzátoru je potenciální rozdíl, resp. napětí. Změníme-li náboj kondenzátoru, změní se intenzita pole mezi elektrodami a napětí mezi nimi tak, že pro daný kondenzátor poměr Q/U zůstává konstantní, tedy $Q/U = \text{konst.}$

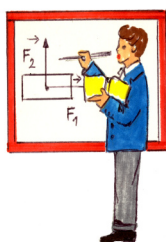
$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{V 3.1.8.-1}$$

Tato konstanta úměrnosti C mezi nábojem a napětím je pro daný kondenzátor konstantní a definuje jeho kapacitu.

Kapacita je číselně rovna náboji kondenzátoru při napětí 1V mezi jeho elektrodami.

Čím větší je kapacita kondenzátoru, tím větší náboj musí být přenesen na jeho elektrody k dosažení napětí 1V mezi nimi.

Jednotkou kapacity v soustavě SI je **farad (F)**. Ze vztahu V 3.1.8.-1 vyplývá, že $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$.



RU 3.1.8.-1. Kapacita kondenzátoru je $3 \mu\text{F}$.

1) Jaké napětí je mezi elektrodami tohoto kondenzátoru, je-li náboj kondenzátoru $0,6 \text{ mC}$?

Řešení:

$$C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ F}, \quad Q = 6 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

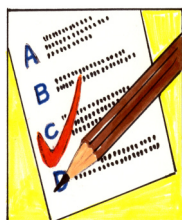
$$\text{Podle V 3.1.8.-1 } U = Q/C \text{ a dosadíme } U = 6 \cdot 10^{-4} / 3 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^2 \text{ V}$$

2) Jaký náboj Q' musí být na kondenzátoru, aby napětí na elektrodách kleslo na $U' = 20 \text{ V}$?

Řešení:

Protože se jedná o stejný kondenzátor, je kapacita (tedy poměr Q/U) konstantní. Protože $U' = U/10$ musí být $Q' = Q/10$, tedy $Q' = 6 \cdot 10^{-5} \text{ C}$.

Kapacitu daného kondenzátoru nezměníme tím, že zvětšíme či zmenšíme velikost náboje na něm.



KO 3.1.8.-1. Na elektrodách kondenzátoru jsou $+Q$ a $-Q$. Jaký je celkový náboj na kondenzátoru?

?

KO 3.1.8.-2. Na kondenzátoru kapacity C je náboj Q a napětí mezi elektrodami U . Zvětšíme-li náboj na tomto kondenzátoru na $Q' = 2Q$, jaké bude napětí U' na elektrodách? $U' =$

?



T 3.1.8.-2

Jak nabíjíme kondenzátor?

Chceme-li kondenzátor nabít, můžeme ho zapojit podle schématu

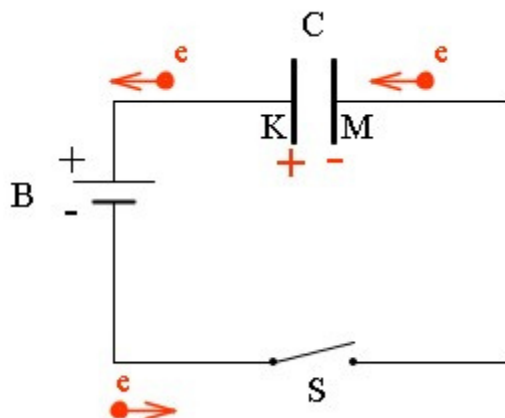
O 3.1.8.-3, kde B je baterie,

S spínač a C kondenzátor,

jehož elektrody jsou označeny

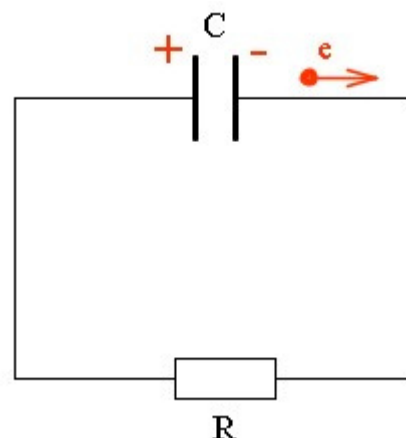
K a M. Ve schématech značíme kondenzátor tímto znakem bez ohledu na jeho typ.

Protože o baterii jsme dosud nehovořili a její funkce bude studována později, přijměte v této fázi výkladu pouze tuto informaci : Baterie je zařízení, které nám udržuje stálé napětí U mezi svými svorkami. Svorku s vyšším potenciálem značíme $+$ (kladný pól zdroje), druhou svorku značíme $-$ (záporný pól).



O 3.1.8.-3

Obvod, který je na obrázku O 3.1.8.-3 není uzavřený, protože spínač S je vypnutý. Když spínač zapneme, obvod se uzavře a může jím procházet elektrický náboj. Elektrické pole (vytvořené baterií) přinutí volné elektrony v obvodu k usměrněnému pohybu od záporného pólu baterie na elektrodu kondenzátoru M a ta se nabíjí záporně. Současně z elektrody K odchází elektrony na plus pól zdroje. Protože elektroda K ztrácí záporný náboj, nabíjí se kladně. Obě elektrody kondenzátoru se nabíjejí současně, takže v každém okamžiku mají stejně velké náboje opačných znamének. Náboj na kondenzátoru roste a současně roste i napětí mezi elektrodami.



O 3.1.8.-4

Tento proces nabíjení kondenzátoru trvá tak dlouho pokud se napětí mezi elektrodami nevyrovná s napětím mezi svorkami baterie. Kondenzátor má schopnost pojmout a udržet elektrický náboj, uchovat elektrické pole a jeho energii. K rychlému uvolnění této energie pak dochází při výboji nabitého kondenzátoru přes rezistor R, jak ukazuje obrázek O 3.1.8.-4. Schopnost kondenzátoru akumulovat elektrickou energii je na příklad základem defibrilačních zařízení, která používají lékaři. Baterie nabíjí kondenzátor na vysoké napětí. Vodivé elektrody se přiloží na hrudník postiženého. Lidské tělo je vodivé a kondenzátor se vybije. Akumulovaná energie kondenzátoru projde tělem pacienta.

T 3.1.8.-3

Jak vypočítáme kapacitu deskového kondenzátoru?

Předpokládejme, že elektrody deskového kondenzátoru jsou tak velké a tak blízko u sebe, že můžeme zanedbat rozptyl elektrického pole na jejich okrajích (viz O 3.1.3.-9b). Budeme tedy předpokládat, že elektrické pole mezi deskami je homogenní, tedy $E = \text{konst.}$ V tomto případě platí vztahy

$$\text{V 3.1.3.-5} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

$$\text{V 3.1.3.-3} \quad \sigma = \frac{Q}{S} \Rightarrow Q = \sigma \cdot S$$

$$\text{V 3.1.6.-8} \quad U = E \cdot d$$

Kapacita C je definována vztahem V 3.1.8.-1

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot d} = \frac{\sigma \cdot S}{\frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot d} \Rightarrow C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{S}{d} \quad \text{V 3.1.8.-2}$$

Vidíme, že kapacita deskového kondenzátoru závisí

- na jeho geometrických parametrech, tj. na obsahu plochy desek S a na jejich vzdálenosti d
- na jakosti dielektrika mezi deskami, tj. na relativní permitivitě ϵ_r . V případě, že v prostoru mezi deskami je vakuum (přibližně vzduch), je $\epsilon_r = 1$.

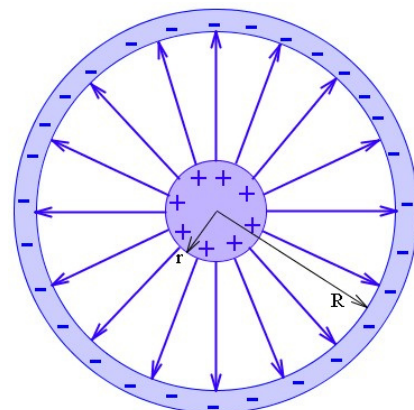
Tyto závěry můžeme zobecnit. Kapacitu válcového nebo kulového kondenzátoru bychom museli řešit jinak, protože mezi elektrodami těchto kondenzátorů není homogenní pole. Matematický tvar obou výsledků by byl sice jiný než u deskového kondenzátoru, ale i zde kapacita závisí jen na

- geometrických parametrech, tj. na poloměrech r a R elektrod resp. na délce L válcového kondenzátoru

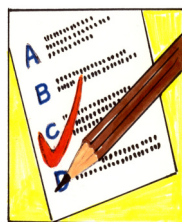
(O 3.1.8.-2)

- na jakosti dielektrika mezi elektrodami.

Ještě jednu poznámku ke vztahu V 3.1.8.-2. Tato rovnice nám dovoluje vyjádřit pohodlně permitivitu vakua v jiných jednotkách než jak vyplynulo z Coulombova zákona. Pokud dosadíte kapacitu C ve faradech, plochu S v m^2 , vzdálenost desek d v metrech a uvážíte, že relativní permitivita ϵ_r je bezrozměrné číslo, potom $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.



O 3.1.8.-2



KO 3.1.8.-3. Deskový vzduchový kondenzátor má kapacitu C pokud vzdálenost elektrod je d a obsah plochy desek je S .

1) Jak se změní jeho kapacita, jestliže vzdálenost jeho desek zvětšíme na $2 \cdot d$?

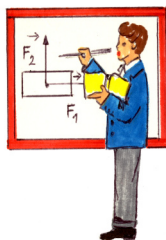
?

2) Jak se změní jeho původní kapacita, jestliže obsah plochy desek zvětšíme na $2 \cdot S$?

?

3) Jak se změní jeho původní kapacita, jestliže prostor mezi jeho elektrodami bude zcela vyplněn materiálem s relativní permitivitou $\epsilon_r = 5$?

?



RU 3.1.8.-2. Desky vakuového deskového kondenzátoru jsou ve vzdálenosti 1 mm. Jak velká by musela být plocha desek, aby kapacita kondenzátoru byla 1 F ?

Řešení:

$$C = 1 \text{ F}, d = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}, \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}, \epsilon_r = 1$$

Ze vztahu V 3.1.8.-2 plyne

$$S = C \cdot d / \epsilon_0 \text{ a dosadíme } S = 1 \cdot 10^{-3} / 8,85 \cdot 10^{-12} = 1,1 \cdot 10^8 \text{ m}^2$$

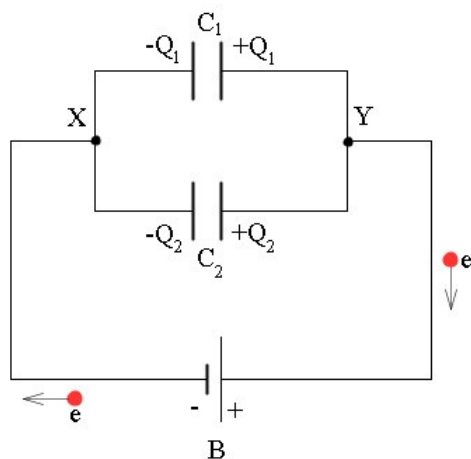
Pokud bychom si představili elektrody takového kondenzátoru jako čtverce, pak strana tohoto čtverce by byla asi 10 km. Jednotka 1 F je hodně velká. Moderní technologie umožňují konstrukci kondenzátorů těchto kapacit, avšak velmi malých rozměrů. Používají se jako zdroje napětí např. pro kritické situace počítačů.



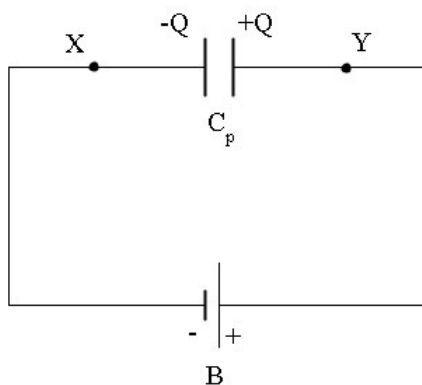
T 3.1.8.-4

Co platí při paralelním spojení kondenzátorů?

Na obrázku O 3.1.8.-5a vidíte dva kondenzátory připojené **paralelně** k baterii B. Kondenzátory jsou zapojeny paralelně, jsou-li jedny elektrody všech kondenzátorů spojeny s jednou svorkou baterie a druhé s druhou svorkou baterie B.



O 3.1.8.-5a



O 3.1.8.-5b

- o Baterie má tu vlastnost, že udržuje na svých svorkách konstantní napětí U . Je-li napětí na svorkách baterie U , je totéž napětí U mezi body X a Y a totéž napětí U je na každém kondenzátoru. Tedy napětí na kondenzátoru C_1 je stejné jako napětí na kondenzátoru C_2 .
- o Elektrické pole baterie způsobí usměrněný pohyb volných elektronů od záporné svorky zdroje k bodu X (uzlu) a tady se celkový tok záporného náboje $-Q$ rozdělí. Část $(-Q_1)$ přejde na levou desku kondenzátoru C_1 a druhá část $(-Q_2)$ na levou desku kondenzátoru C_2 . Levé desky obou kondenzátorů budou záporné. Současně odcházejí elektrony z pravých desek obou kondenzátorů směrem k bodu Y a dále na kladnou svorku zdroje. Protože pravé desky obou kondenzátorů ztrácí záporné náboje, nabíjí se

kladně a náboje na nich budou $+Q_1$ a $+Q_2$. Zdroj dodal do obvodu náboj Q , na kondenzátorech jsou náboje Q_1 a Q_2 . Musí tedy platit $Q = Q_1 + Q_2$.

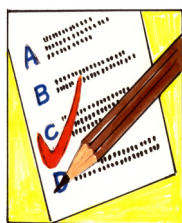
- o Na obrázku O 3.1.8.-5b vidíte kondenzátor s výslednou kapacitou C_p , která nahrazuje kapacitu paralelní kombinace. Pokud odpovíme na otázky: jaké je napětí, náboj a kapacita na tomto kondenzátoru, budeme znát i odpověď na otázku z úvodu této kapitoly.

Napětí na paralelní kombinaci kondenzátorů je stejné jako napětí na každém z nich.

Celkový náboj paralelní kombinace kondenzátorů je roven součtu nábojů na jednotlivých kondenzátorech.

Tedy platí, že celkový náboj $Q = Q_1 + Q_2$ (a)
 Podle V 3.1.8.-1 je $Q = C_p \cdot U$ $Q_1 = C_1 \cdot U$ $Q_2 = C_2 \cdot U$ (b)
 Výrazy (b) dosadíme do rovnice (a) $C_p \cdot U = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U$
 a po úpravě dostaneme $C_p = C_1 + C_2$.

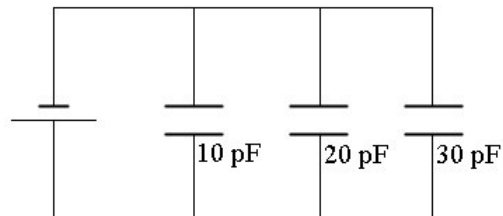
Výsledná kapacita paralelní kombinace kondenzátorů je rovna součtu kapacit jednotlivých kondenzátorů.



KO 3.1.8.-4. Tři kondenzátory o kapacitách 10 pF, 20 pF a 30 pF jsou připojeny ke zdroji podle obrázku O 3.1.8.-6b.

1) Největší napětí je na kondenzátoru

- a) s kapacitou 10 pF
- b) s kapacitou 20 pF
- c) s kapacitou 30 pF
- d) na všech kondenzátorech je stejné



O 3.1.8.-6b

2) Největší elektrický náboj je na kondenzátoru

- a) s kapacitou 10 pF
- b) s kapacitou 20 pF
- c) s kapacitou 30 pF
- d) na všech kondenzátorech je stejný

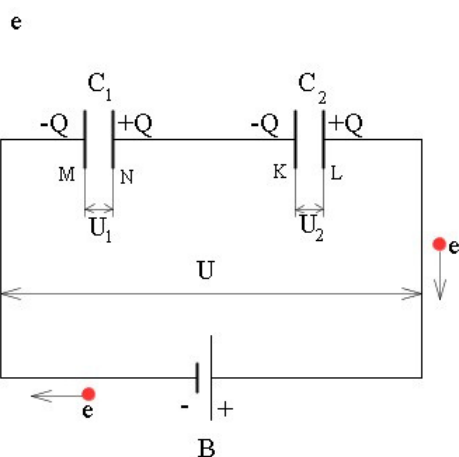
?



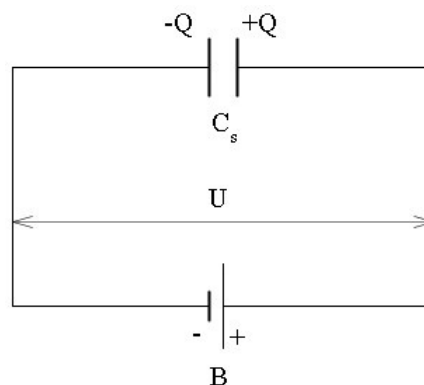
T 3.1.8.-5

Co platí při sériovém spojení kondenzátorů?

Kondenzátory o kapacitách C_1 a C_2 na obrázku O 3.1.8.-7a jsou zapojeny **v sérii** a tato sériová kombinace je připojena k baterii, na které je napětí U . Elektrody kondenzátorů jsou označeny písmeny M, N a K, L.



O 3.1.8.-7a



obr. 3.1.8.-7b

Kondenzátory jsou zapojeny v sérii když jedna elektroda prvního kondenzátoru (N) je spojena s elektrodou druhého kondenzátoru (K) atd. Volné elektrody prvního a posledního kondenzátoru (M a L) tvoří začátek a konec celé sériové kombinace a jsou připojeny na zdroj.

- Celý elektrický obvod si rozdělíme na tři části. První část je od záporné svorky baterie na elektrodu M. Druhá část je mezi elektrodami N a K. Třetí část je od elektrody L na kladnou svorku baterie.

V první a třetí části se pohybují volné elektrony pod vlivem síly elektrického pole baterie. V první části od záporné svorky zdroje směrem k elektrodě M, která se nabíjí záporně ($-Q$) a v třetí části od elektrody L směrem ke kladné svorce baterie. Elektroda L ztrácí stejně velký záporný náboj jako přijala elektroda M, nabíjí se tedy kladně ($+Q$).

Druhá část obvodu (mezi elektrodami N a K) je elektricky izolovaná od zbytku obvodu a nemůže přijmout ani odevzdat žádný elektrický náboj. V této části obvodu dochází pouze k přerozdělování náboje na principu elektrostatické indukce. Na elektrodě N se indukují stejně velký ale opačný náboj než je na elektrodě M, tedy $+Q$ a odpuzené elektrony nabíjí elektrodu K záporně ($-Q$). Konečným výsledkem je stejný náboj na každém kondenzátoru v sériové kombinaci.

- Je-li napětí na svorkách baterie U , pak toto napětí je rovněž mezi elektrodami M a L. Označíme-li U_1 a U_2 napětí na jednotlivých kondenzátorech, potom $U = U_1 + U_2$.

- Na obrázku O 3.1.8.-7b vidíte kondenzátor s výslednou kapacitou C_s , která nahrazuje kapacitu sériové kombinace. Pokud odpovíme na otázky: jaké je napětí, náboj a kapacita na tomto kondenzátoru, budeme znát i odpověď na otázku z úvodu této kapitoly.

Náboj Q je stejný na každém kondenzátoru v sériové kombinaci.

Napětí na sériové kombinaci kondenzátorů je rovno součtu napětí na jednotlivých kondenzátorech.

Platí tedy, že napětí na sériové kombinaci
Podle V 3.1.8.-1 je

$$U = U_1 + U_2 \quad (a)$$

$$U = Q / C_s \quad U_1 = Q / C_1 \quad U_2 = Q / C_2 \quad (b)$$

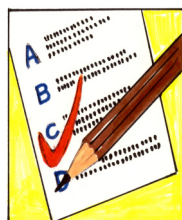
Výrazy (b) dosadíme do rovnice (a)

$$\frac{Q}{C_s} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

A po úpravě dostaneme

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Převrácená hodnota výsledné kapacity sériové kombinace kondenzátorů je rovna součtu převrácených hodnot kapacit jednotlivých kondenzátorů.



KO 3.1.8.-5. Výsledná kapacita sériové kombinace kondenzátorů je vždy

- a) menší
- b) větší

než kapacita kteréhokoliv z nich.

?

KO 3.1.8.-6. Tři kondenzátory o kapacitách 10 pF, 20 pF a 30 pF jsou připojeny ke zdroji podle obrázku O 3.1.8.-6a

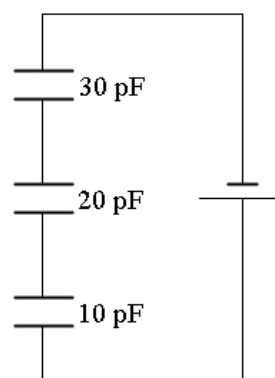
1) Největší napětí je na kondenzátoru

- a) s kapacitou 10 pF
- b) s kapacitou 20 pF
- c) s kapacitou 30 pF
- d) na všech kondenzátorech je stejné

2) Největší elektrický náboj je na kondenzátoru

- a) s kapacitou 10 pF
- b) s kapacitou 20 pF
- c) s kapacitou 30 pF
- d) na všech kondenzátorech je stejný

?

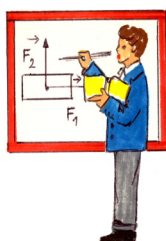


O 3.1.8.-6a



T 3.1.8.-6

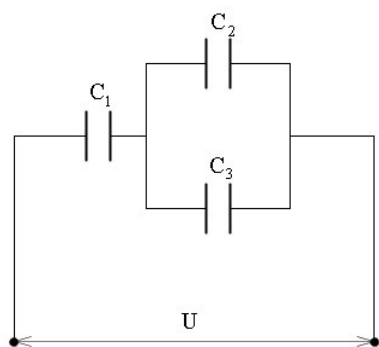
Pokud máme řešit složitější kombinaci kondenzátorů, můžeme ji rozložit na menší části s paralelním a sériovým zapojením kondenzátorů. Každou takovou menší část nahradíme výslednou kapacitou, což vede ke zjednodušení původní kombinace.



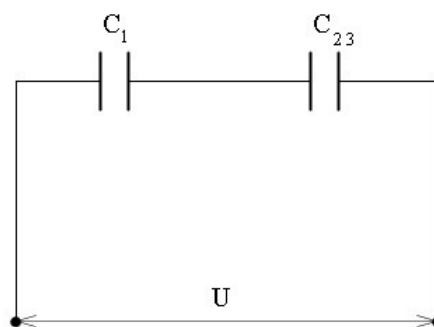
RU 3.1.8.-3. Tři kondenzátory jsou zapojeny podle schématu O 3.1.8.-9a.

Jejich kapacity jsou $C_1 = 3 \mu\text{F}$, $C_2 = 2 \mu\text{F}$, $C_3 = 4 \mu\text{F}$. Na vstupní svorky kondenzátorů je připojeno napětí 60 V.

- 1) Vypočítejte výslednou kapacitu této kombinace.
- 2) Vypočítejte náboj a napětí na kondenzátoru C_1 .
- 3) Jak velké je napětí na C_1 ?



O 3.1.8.-9a



O 3.1.8.-9b

Řešení:

$C_1 = 3 \mu\text{F} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $C_2 = 2 \mu\text{F} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $C_3 = 4 \mu\text{F} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $U = 60 \text{ V}$

1)

Kondenzátory C_2 a C_3 jsou zapojeny paralelně. Vypočítejte jejich výslednou kapacitu $C_{23} = ?$

?

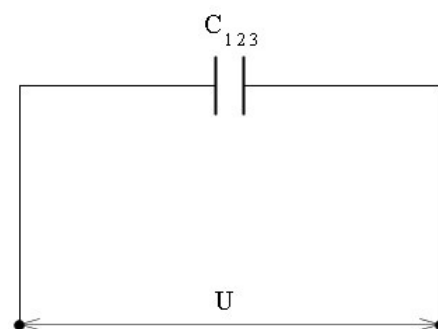
Kondenzátory C_2 a C_3 můžeme nahradit kondenzátorem s kapacitou C_{23} jak vidíte na obrázku O 3.1.8.-9b. Kondenzátory C_1 a C_{23} jsou zapojeny do série. Vypočítejte jejich výslednou kapacitu C_{123} (dosazujte v mikrofarazech). $C_{123} =$

?

2)

Dívejte se na obrázek O 3.1.8.-9b. Kondenzátory C_1 a C_{23} jsou zapojeny v sérii, náboj na nich je stejný a je roven celkovému náboji, tedy náboji na kondenzátoru C_{123} na obrázku O 3.1.8.-9c. Jak velký náboj je na kondenzátoru C_{123} ?

?



O 3.1.8.-9c

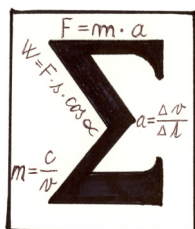
Jak velký náboj je na kondenzátoru C_1 ?

?

3)

Jak velké je napětí na C_1 ?

?



Kondenzátor se skládá ze dvou vzájemně elektricky oddělených vodičů (elektrod). Pokud je kondenzátor nabitý, na elektrodách jsou stejně velké náboje opačných znamének. Jeho kapacita je dána vztahem

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{V 3.1.8.-1}$$

Jednotkou kapacity je **farad (F)**.

Deskový kondenzátor je tvořen rovinnými rovnoběžnými deskami. Je-li jejich vzdálenost d a má-li každá elektroda plochu o obsahu S , je kapacita deskového kondenzátoru

$$C = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad \text{V 3.1.8.-2}$$

Pokud jsou kondenzátory zapojeny **paralelně**, jejich výsledná kapacita je dána součtem kapacit

$$C_p = C_1 + C_2$$

Zapojíme-li kondenzátory do **série**, pro výslednou kapacitu platí

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

3.2. Elektrický proud



T 3.2.0

V předchozí kapitole jsme vyšetřovali elektrostatické pole, tedy pole nabitých těles ve vakuu a v dielektriku.

V této kapitole se budeme zabývat usměrněným pohybem částic s nábojem, tj. elektrickým proudem. Ve **vodiči**, jímž prochází proud, **musí být elektrické pole**, neboť jinak by náboje nekonaly usměrněný pohyb.

Není to však pole elektrostatické. Od elektrostatického pole se liší tím, že **není schopné samostatné existence**. Je třeba neustále udržovat na koncích vodiče napětí, tj. zachování pole je spojeno s dodáváním energie z vnějšku (ze zdroje).

Pokud je elektrické pole ve vodiči časově neproměnné (jeho intenzita se nemění s časem) vyvolává ve vodiči stálý elektrický proud. Takové pole nazýváme **stacionární elektrické pole**.

3.2.1. Základní pojmy



- vysvětlit pojem elektrický proud
- vědět, že tímto názvem označujeme jednak fyzikální děj a jednak veličinu
- znát definiční vztah proudu
- znát jednotku proudu
- objasnit nesouhlas mezi dohodnutým směrem proudu a skutečným směrem nosičů náboje



30 minut



Elektrický náboj a jeho jednotka. Elektrické pole a jeho charakteristiky: intenzita a potenciál.



T 3.2.1.-1

Co rozumíme pod pojmem elektrický proud ?

Pod pojmem **elektrický proud** rozumíme jednak fyzikální děj a jednak fyzikální veličinu.

- Elektrický proud je fyzikální děj. Je to uspořádaný (usměrněný) pohyb volných částic s elektrickým nábojem. Látky, v níž jsou volné elektrické

nabité částice, vedou dobře elektrický proud. Nazýváme je **vodiče**.

Jsou to **kovy**, nositelé elektrického proudu jsou **volné elektrony**

roztoky elektrolytů, nositelé proudu jsou **kladné a záporné ionty**

ionizované plyny a plazma, nositelé proudu jsou **elektrony a ionty**.

Elektrický proud může také vzniknout v **polovodičích**, kde nositelé proudu jsou **elektrony a díry**.

• Elektrický proud je fyzikální veličina, která tento děj kvantitativně charakterizuje.

Elektrický proud I je skalární veličina definována vztahem

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{V 3.2.1.-1}$$

kde ΔQ je celkový náboj, který projde zvoleným rovinným řezem vodiče za dobu Δt . Ve zvláštním případě, tj. je-li proud I konstantní, můžeme vztah V 3.2.1.-1 zapsat takto :

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{V 3.2.1.-2}$$

Jednotkou proudu v soustavě SI je ampér (A). Je to jedna ze základních jednotek soustavy SI.

S přesnou definici ampéru se seznámíme později. Ze vztahu V 3.2.1.-2 však můžeme vyjádřit jednotku náboje (coulomb) v základních jednotkách SI.

1 C = 1 A.s.

T 3.2.1.-2

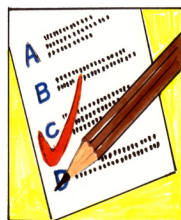
Jak je definován směr proudu?

Vodič se vyznačuje tím, že obsahuje volné elektricky nabité částice. Aby došlo k jejich usměrněnému pohybu (jinými slovy - aby vodičem procházel proud) musí na ně působit síla elektrického pole. Podle definice V 3.1.4.-1 působí na volnou nabitou částici s nábojem Q elektrické pole intenzity E silou, jejíž velikost je $F = E \cdot Q$.

Chceme-li ve vodiči udržet stálý proud, musíme uvnitř vodiče trvale udržovat elektrické pole intenzity E . Má-li intenzita pole stále stejný směr, je proud **stejnoseměrný**. Mění-li intenzita pole ve vodiči periodicky svůj směr, je proud **střídavý**.

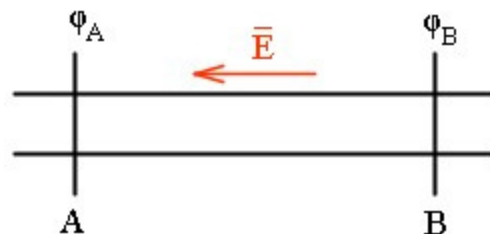
Směrem elektrického proudu ve vodiči nazýváme podle dohody směr uspořádaného pohybu **kladně** nabitých nosičů náboje.

Proudové šipky (např. ve schématech) kreslíme ve směru, ve kterém by se pohyboval kladný náboj. Děláme to i v případě, kdy skutečné nosiče nábojů jsou záporné a pohybují se tedy v opačném směru.



?

KO 3.2.1.-1. Uvažujme kovový vodič na obrázku O 3.2.1.-1. Zvolíme si dva průřezy A a B. Potenciály v těchto místech jsou φ_A a φ_B tak, že $\varphi_A > \varphi_B$. Na obrázku je chyba. Víte jaká?

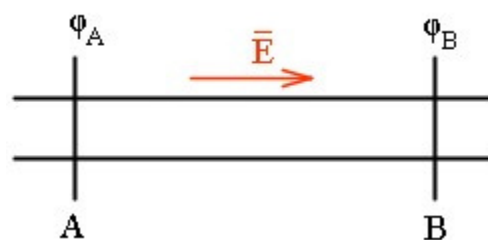


O 3.2.1.-1.

KO 3.2.1.-2. Tak ještě jednou. Uvažujme kovový vodič na obrázku O 3.2.1.-2. Zvolíme si dva průřezy A a B. Potenciály v těchto místech jsou φ_A a φ_B tak, že $\varphi_A > \varphi_B$. Směr vektoru

intenzity je nyní správně. Jakým směrem se pohybují ve vodiči elektrony, které se účastní vedení proudu?

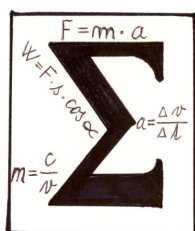
- a) od místa A k B
- b) od místa B k A
- ?



O 3.2.1.-2.

KO 3.2.1.-3. Jaký je směr elektrického proudu na obrázku O 3.2.1.-2.?

- a) od A k B
- b) od B k A
- ?



Pod pojmem **elektrický proud** rozumíme jednak fyzikální děj a jednak fyzikální veličinu. Elektrický proud je uspořádaný pohyb nosičů nábojů. Jako skalární fyzikální veličina je definován vztahem

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{V 3.2.1.-1}$$

respektive $I = \frac{Q}{t} \quad \text{V 3.2.1.-2}$

kde Q je náboj, který za dobu t projde průřezem vodiče.

Jednotkou elektrického proudu v soustavě SI je **ampér**. **Směr proudu** je podle dohody shodný se směrem pohybu **kladně** nabitých nosičů náboje.

V kovech jsou nosiči nábojů volné elektrony. Aby kovový vodič vedl elektrický proud musí být připojen ke zdroji napětí.

3.2.2. Elektrický proud v kovech.



- vysvětlit podstatu vedení proudu v kovových vodičích a podmínky jeho vzniku
- umět formulovat Ohmův zákon



30 minut



Zopakujte si pojmy : proud, napětí.



T 3.2.2.-1

Jakou rychlostí se pohybují volné elektrony ve vodiči?

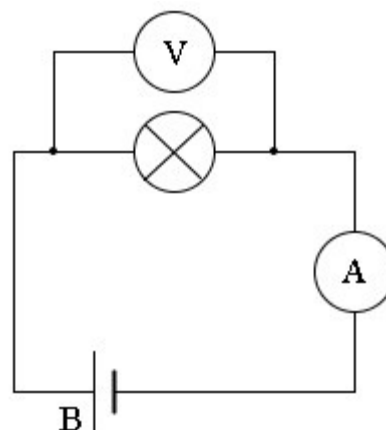
Jednou z vlastností kovů je, že část elektronů jsou v atomech velmi slabě poutány k jádru a mohou se snadno z atomu uvolnit. Hovoříme o **volných** elektronech. V kovech jsou tedy nosiči nábojů volné elektrony. Jestliže vodičem neprochází žádný elektrický proud, pohybují se tyto volné elektrony chaoticky a nepřevládá žádný výsledný směr jejich pohybu. Rychlost tohoto tepelného pohybu je řádově 10^5 m/s - 10^6 m/s . Připojíme-li kovový vodič ke zdroji napětí, vznikne ve vodiči elektrické pole. To působí silou na každý volný elektron a výsledkem je uspořádaný pohyb volných elektronů. Volné elektrony kromě chaotického tepelného pohybu jsou nyní unášeny **driftovou (unášivou) rychlostí** ve směru opačném, než je směr intenzity elektrického pole. Driftová rychlost je velmi malá ve srovnání s rychlostí chaotického pohybu. Například v měděném vodiči v domovní instalaci je řádově 10^{-5} m/s .

T 3.2.2.-2

Čeho se týká Ohmův zákon?

Podmínkou existence proudu ve vodiči je přítomnost elektrického pole. Působením sil elektrického pole se uvádějí volné elektrony do uspořádaného pohybu a tak vzniká elektrický proud.

Na obrázku O 3.2.2.-1 je jednoduché schéma elektrického obvodu. Ke svorkám zdroje napětí B, které můžeme měnit, je připojena vodivá součástka (např. žárovka) a ampérmetr. Napětí na zkoumané součástce měříme voltmetrem. Během měření dbáme na to, aby teplota zkoumaného odporu byla konstantní. Hledejme nyní vztah mezi napětím U na žárovce a proudem I , který žárovkou prochází. Napětí odečítáme na voltmetru V a proud na ampérmetru A. G.S.Ohm experimentálně ukázal, že měníme-li napětí U (změnou napětí na zdroji), mění se proud I , který prochází žárovkou.



O 3.2.2.-1

Zákon je nazýván Ohmovým zákonem a můžeme jej formulovat takto:

Pro součástku, řídící se Ohmovým zákonem je proud (který jí prochází) přímo úměrný napětí U (které je na součástce),

tj. platí

$$I = G \cdot U \quad \text{V 3.2.2.-1}$$

Konstanta úměrnosti G se nazývá **elektrická vodivost (konduktance)** vodiče.

Její jednotkou je siemens (S).

Převrácená hodnota elektrické vodivosti se nazývá **elektrický odpor (rezistance)** vodiče R .

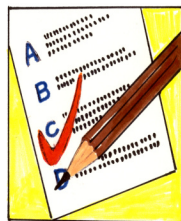
$$R = \frac{1}{G} \quad \text{V 3.2.2.-2}$$

Jednotkou odporu v soustavě SI je ohm (Ω).

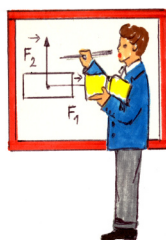
Dosadíme-li V 3.2.2.-2 do V 3.2.2.-1 můžeme Ohmův zákon psát ve tvaru

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{V 3.2.2.-3}$$

Vodiče, pro které platí Ohmův zákon, nazýváme **lineární vodiče**.



KO 3.2.2.-1. Je-li na vodiči napětí 50 V, prochází jím proud 0,5 A. Jaký proud bude vodičem procházet, bude-li na něm napětí 100 V (za jinak stejných podmínek)?
?



RU 3.2.2.-1. Jaký odpor má telefonní sluchátko, kterým při napětí 60 V prochází proud 30 mA?

Řešení:

$$I = 3 \cdot 10^{-2} \text{ A}, U = 60 \text{ V}$$

Podle V 3.2.2.-3 platí $R = U/I$ a po dosazení $R = 2 \text{ k}\Omega$

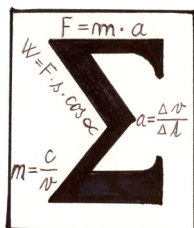
RU 3.2.2.-2. Ze zdroje 6 V můžeme odebírat maximálně proud 100 mA. Můžeme k tomuto zdroji připojit spotřebič o odporu 2 k Ω ?

Řešení:

$$U = 6 \text{ V}, I_{\max} = 100 \text{ mA} = 0,1 \text{ A}, R = 2 \text{ k}\Omega = 2 \cdot 10^3 \Omega$$

Je-li na spotřebiči, jehož odpor je $R = 2 \cdot 10^3 \Omega$ napětí $U = 6 \text{ V}$, prochází spotřebičem proud $I = U/R$, tedy $I = 6 / (2 \cdot 10^3) \text{ A} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ A}$

Spotřebičem prochází proud 3 mA. Tento proud je menší než dovolený maximální proud a proto spotřebič můžeme připojit.



Pokud na vodiči zvyšujeme napětí U , roste proud I procházející vodičem. Ohm experimentálně ukázal, že

$$I = G \cdot U \quad \text{V 3.2.2.-1}$$

nebo

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{V 3.2.2.-3}$$

R je **elektrický odpor** a G **elektrická vodivost**. Jednotkou odporu je **ohm**, jednotkou vodivosti je **siemens**.



- vysvětlit pojem rezistor a jeho elektrický odpor

- znát veličiny R a G , charakterizující odpor a vodivost vodiče
- znát jednotky odporu a vodivosti
- vědět jak závisí odpor vodiče na jeho geometrických vlastnostech
- vysvětlit změnu odporu vodiče v závislosti na teplotě
- vědět jak se mění odpor s teplotou
- seznámit se s teplotním součinitelem odporu
- popsat chování kovových vodičů při teplotách blízkých nule termodynamické stupnice



45 minut



Ohmův zákon. Vyjádření teploty T (K) a t ($^{\circ}\text{C}$)

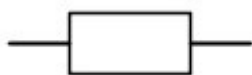


T 3.2.3.-1

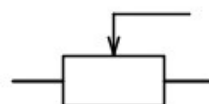
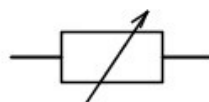
Co je rezistor a co je příčinou jeho elektrického odporu?

Co je příčinou elektrického odporu? Je-li ve vodiči elektrické pole, nebo jinak řečeno je-li na jeho koncích napětí, dochází ke vzniku usměrněného pohybu volných elektronů. Rychlost tohoto usměrněného pohybu jsme nazvali unášivou rychlostí. Říkáme, že vodičem prochází proud. Usměrněný pohyb volných elektronů je doprovázen častými srážkami s ionty mřížky, které kmitají kolem svých rovnovážných poloh. A právě tyto srážky volných elektronů s ionty mřížky jsou příčinou elektrického odporu. Součástka elektrického obvodu, která je charakterizována svým elektrickým odporem R , se nazývá **rezistor**. Ve schématu elektrického obvodu znázorňujeme rezistor značkou, kterou vidíte na obrázku O 3.2.3.-1.

Kromě rezistorů s pevnými hodnotami odporu R se používají rezistory s proměnným odporem – **reostaty**, jejichž značku vidíte na obrázku O 3.2.3.-2.



O 3.2.3.-1



O 3.2.3.-2

T 3.2.3.-2

Jednotlivé vodivé materiály se liší počtem volných elektronů v objemové jednotce (např. v 1 cm^3 mědi je řádově 10^{22} volných elektronů) a jiným uspořádáním mřížky. Různé materiály kladou při průchodu elektrického proudu různý odpor R .

T 3.2.3.-3

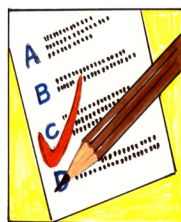
Odpor R závisí na geometrických vlastnostech vodiče a na materiálu, ze kterého je vodič. Toto tvrzení lze vyjádřit vztahem

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \text{V 3.2.3.-1}$$

kde l je délka vodiče, S velikost průřezu vodiče a ρ **měrný elektrický odpor** (rezistivita) látky, z níž je vodič zhotoven. Jednotkou rezistivity je $\Omega \cdot \text{m}$.

Veličina $1/\rho$ se nazývá **měrná elektrická vodivost** (konduktivita). Jednotkou této veličiny je siemens na metr ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).

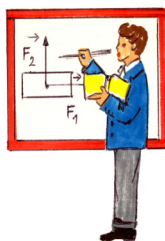
Rezistivity ρ pro typické kovy (stříbro, měď, hliník, železo) jsou při pokojové teplotě řádově $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Rezistivita skla (izolantu) je $10^{10} - 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$.



KO 3.2.3.-1. Vodič délky l a průměru d má odpor R . Jaký bude odpor tohoto vodiče R_1 , zvětší-li se jeho průměr na $2.d$. $R_1 =$

- a) $R/2$
- b) $2.R$
- c) $4.R$
- d) $R/4$

?



RU 3.2.3.-1. Určete pokles napětí na hliníkové dvojlinkě dlouhé 500 m, jestliže dvojlinkou prochází proud 15 A. Každý z vodičů má obsah příčného řezu 10 mm^2 . Měrný elektrický odpor hliníku je $2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

Řešení: $L = 500 \text{ m}$, $I = 15 \text{ A}$, $S = 10 \text{ mm}^2 = 10^{-5} \text{ m}^2$, $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

odpor dvojlinky je $R = 2.L. \rho / S$

napětí vypočítáme z Ohmova zákona $U = I.R$

dosadíme-li za R dostaneme $U = 2.L.I. \rho / S$

Dosadíme: $U = 2.500.15. 2,7 \cdot 10^{-8} / 10^{-5} \text{ V} = 4,05 \text{ V}$

Pokles napětí na dvojlince je 4,05 V.



T 3.2.3.-4

V předchozím textu bylo řečeno, že příčinou elektrického odporu jsou srážky volných elektronů s ionty mřížky. S rostoucí teplotou se amplituda kmitů iontů zvětšuje a tím pravděpodobnost srážek elektronů s ionty roste. Srážky jsou častější, odpor vodiče roste. Závislost odporu na teplotě v běžné praxi vyjadřujeme takto:

$$R = R_1(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad \text{nebo} \quad R = R_1(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad \text{V 3.2.3.-2}$$

kde R je elektrický odpor při teplotě t (resp. T), R_1 odpor při referenční (vztažné) teplotě t_1 (resp. T_1),

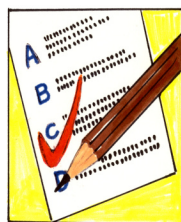
$\Delta t = t - t_1$ (resp. $\Delta T = T - T_1$) je teplotní rozdíl a α je **teplotní součinitel elektrického odporu**, charakteristický pro materiál. Jednotka teplotního součinitele odporu je K^{-1} .

Z rovnice V 3.2.3.-2 plyne

$$\alpha = \frac{R - R_1}{R_1 \cdot \Delta T} = \frac{\Delta R}{R_1 \cdot \Delta T} \quad \text{V 3.2.3.-3}$$

Pro typické kovy je α řádově $10^{-3} K^{-1}$. Pro kovy je α kladné, odpor kovů s rostoucí teplotou roste. Vztah V 3.2.3.-2 je přibližný. Lze jej použít pro nepříliš velké teplotní rozdíly Δt , neplatí ani pro nízké, ani pro vysoké teploty.

Supravodivost je jev spočívající v náhlém poklesu elektrického odporu materiálu na prakticky nulovou hodnotu, blíží-li se teplota materiálu k 0 K. Rezistivita ρ je v takovém případě menší než $10^{-25} \Omega \cdot m$. Byla objevena holandským fyzikem K Onnesem v roce 1911. Ten zjistil, že odpor rtuti klesne prudce k nule při zhruba 4 K. Před rokem 1986 brzdily rozvoj supravodivých technologií vysoké náklady potřebné k dosažení extrémně nízkých teplot. V roce 1986 byly objeveny nové keramické materiály, které se stávají supravodivými při výrazně vyšších teplotách (77 K) a které jsou snadněji dosažitelné. Využití supravodivých materiálů je velké, např. při výrobě supravodivých kabelů, v lékařství (tomograf), výpočetní technice, v dopravě atd.



KO 3.2.3.-2. Ze vztahu V 3.2.3.-2 plyne, že zvětší-li se teplota odporu z teploty t_1 na t změní se odpor vodiče o ΔR . Vypočítejte z uvedeného vztahu $\Delta R = R - R_1$.

?

KO 3.2.3.-3. Ze vztahu V 3.2.3.-1 vyjádřete ρ , dosad'te jednotky veličin v SI a najděte jednotku rezistivity.

?

KO 3.2.3.-4. Proč je elektrický proud procházející žárovkou okamžitě po jejím rozsvícení větší než když žárovka trvale svítí ?

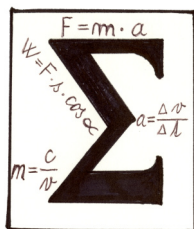
?



T 3.2.3.-5

Velký vliv na velikost odporu kovů mají různé příměsi. Nepatrné příměsi mohou značně zvětšit odpor čistého kovu (odporové slitiny).

Odpor kovu závisí též na jeho zpracování : kování, protahování a zakalování zvyšuje odpor kovů.



Elektrický odpor závisí na **délce** vodiče l , **průřezu** vodiče S a na **měrném elektrickém odporu** (rezistivitě) ρ materiálu vodiče podle vztahu

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \text{V 3.2.3.-1}$$

Elektrický odpor závisí na **teplotě** a to tak, že u kovů odpor s rostoucí teplotou roste. Pro běžné výpočty můžeme použít přibližného vztahu

$$R = R_1(1 + \alpha \Delta t) \text{ nebo } R = R_1(1 + \alpha \Delta T) \quad \text{V 3.2.3.-2}$$

kde R je odpor vodiče při teplotě t , R_1 je odpor při vztážené teplotě t_1 a α je teplotní součinitel odporu. **Supravodiče** jsou materiály, jejichž rezistivita při velmi nízkých teplotách se blíží k nule.

Na velikost odporu kovu má vliv také přítomnost příměsí nebo způsob zpracování.

3.2.4. Práce a výkon proudu



- umět vyjádřit elektrickou práci, popř. energii
- umět vypočítat množství tepla uvolněného při průchodu elektrického proudu vodičem
- umět formulovat zákon Joule - Lenzův
- znát vztah pro výkon stejnosměrného elektrického proudu



30 minut



Práce v elektrickém poli. Definice proudu. Ohmův zákon. Teplo potřebné k ohřátí látky.



T 3.2.4.-1

Ve statickém elektrickém poli vykonají síly pole při přemístění náboje Q z bodu o potenciálu φ_1 do bodu o potenciálu φ_2 práci (podle V 3.1.6.-3)

$$W = Q(\varphi_1 - \varphi_2) = Q \cdot U$$

Tento vztah platí i pro stacionární elektrické pole které vyvolává ve vodiči stálý proud I . Při něm projde kterýmkoliv průřezem vodiče za dobu t náboj $Q = I \cdot t$, takže práce vykonaná elektrickým polem při přechodu náboje Q mezi dvěma body vodiče, mezi nimiž je napětí U je

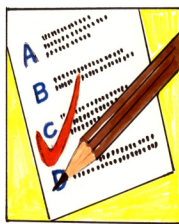
$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t \quad \text{V 3.2.4.-1}$$

Použijeme-li Ohmův zákon V 3.2.2.-3, můžeme psát

$$W = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad \text{V 3.2.4.-2}$$

Výkon elektrického pole (všeobecně se používá termínu „výkon proudu“) v části obvodu je

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad \text{V 3.2.4.-3}$$



KO 3.2.4.-1. Při odebírání proudu se měří odebíraná energie součinem výkonu P a doby t podle vztahu W (resp. E) = $P \cdot t$ a nejčastěji se udává v kW.h. Kolik joulů je 1 kW.h ?



T 3.2.4.-2

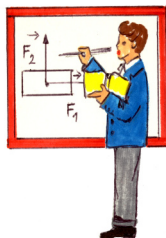
Kolik tepla se vyvine v zapnuté varné konvici?

Při průchodu proudu vodičem se vodič zahřívá. Vznik tepla je spojen s pohybem nábojů, a tedy s prací elektrických sil. Volné elektrony pohybující se ve vodiči pod vlivem elektrického pole získávají kinetickou energii, kterou předají při srážce mřížce kovu. Po každé srážce nabývá elektron vlivem pole znovu tuto kinetickou energii a znovu ji při další srážce předá kovu. Tím se kov zahřívá na účet práce konané silami elektrického pole. Je proto teplo, které se při průchodu proudu ve vodiči vyvine, rovno práci proudu a platí pro ně rovnice V 3.2.4.-2. Tuto závislost odvodili J.P.Joule a Lenz a nazývá se **Joulův - Lenzův zákon**. Teplo jsme zvyklí značit symbolem Q . Ale protože v této kapitole značíme symbolem Q náboj, budeme pro teplo v této kapitole používat symbol E jako energii. Tedy

$$E = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = U^2 \cdot t / R$$

A co když zapnete mixér?

Energie dodávaná zdrojem se mění všechna v energii tepelnou jen tehdy, nejsou-li v obvodu zapojeny přístroje, v nichž by proud konal nějakou (mechanickou) práci. Obecně se tedy elektrická energie mění jednak v teplo, jednak v práci.



RU 3.2.4.-1. Za jakou dobu τ uvede ponorný vaříč o příkonu 800 W do varu 0,5 l vody o počáteční teplotě 20°C. Výměnu tepla s okolím neuvažujte.

Řešení : $P_0 = 800$ W, $m = 0,5$ kg, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 100^\circ\text{C}$, $c = 4,2 \cdot 10^3$ J/(kg.K), $\tau = ?$

Voda o hmotnosti m při zahřátí z teploty t_1 na t_2 přijme teplo

$E = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$ kde c je měrná tepelná kapacita vody.

Ve vaříči vzniká teplo $E = U \cdot I \cdot \tau = P_0 \cdot \tau$

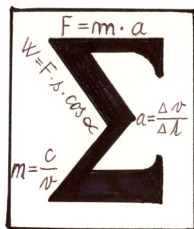
Protože nemáme podle textu uvažovat ztráty, porovnáním obou vztahů pro energii E (teplo) dostáváme

$$P_0 \cdot \tau = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

a odtud hledaný čas $\tau = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) / P_0$

Dosadíme numericky: $\tau = 0,5 \cdot 4200 \cdot (100 - 20) / 800 = 210$ s

Voda se ohřeje za 210 s.



Práce proudu je definována vztahem

$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t$$

V 3.2.4.-1

Tento vztah můžeme upravit použitím Ohmova zákona.

Výkon P proudu v součástce, na níž je napětí U a kterou prochází proud I , je roven

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$$

V 3.2.4.-3

Energie, která je dodána do obvodu zdrojem se mění jednak v teplo (Joule – Lenzův zákon) a jednak v práci.

3.2.5. Elektrický zdroj napětí



- vysvětlit funkci zdroje elektromotorického napětí v obvodu
- umět vysvětlit pojmy: elektromotorické napětí, svorkové napětí, vnitřní odpor zdroje
- umět vyjádřit vztah mezi elektromotorickým a svorkovým napětím



60 minut



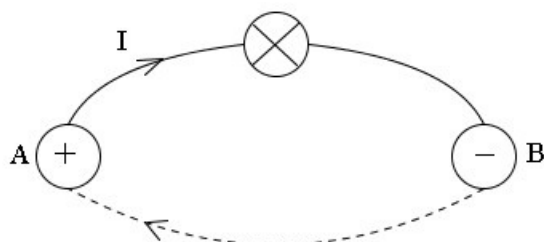
Definice napětí. Výkon proudu. Ohmův zákon.



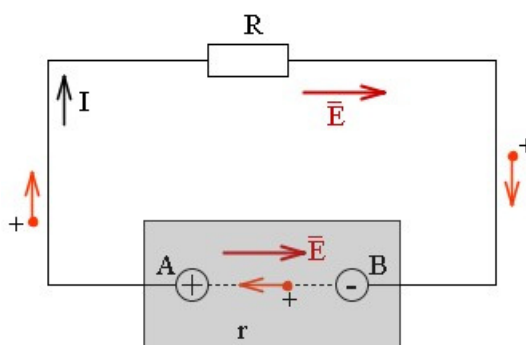
T 3.2.5.-1

Jakou funkci plní v obvodu elektrický zdroj?

Chceme-li, aby žárovka na obrázku O 3.2.5.-1 svítila, musíme zajistit, aby jí procházel proud. Na žárovce musí být napětí. Můžeme to teoreticky udělat tak, že nabijeme dva vodiče A a B.



O 3.2.5.-1



O 3.2.5.-2

Těleso A nabijeme kladně, těleso B záporně a vodič je spojíme přes žárovku. Avšak tímto způsobem bychom si dlouho neposvítili. Jakmile začne procházet žárovkou proud, vodiče A a B se vybíjejí a za krátkou dobu budou mít obě tělesa stejný potenciál a tok náboje se zastaví. Aby žárovka svítila trvale, museli bychom na vodič A přivádět stejný náboj, který

přijal vodič B (jak ukazuje čárkovaná čára). Připomeňte si úmluvu, podle které označujeme směr proudu v souladu s pohybem částic s kladným nábojem.

A ještě jednu technickou poznámku. Pokud budeme popisovat zdroj, potom

- **póly** zdroje jsou části zdroje mezi kterými se udržuje napětí

- **svorky** zdroje jsou póly vyvedené na povrch zdroje a upravené pro praktické připojení vodiče.

Sledujte O 3.2.5.-2.

- Vnější část obvodu tvoří rezistory, vodiče, měřicí přístroje atd. připojené ke svorkám zdroje. Celkový odpor této části obvodu je **vnější odpor obvodu R** .

Ve vnější části obvodu ARB se pohybují částice s kladným nábojem od +A k - B, tedy ve směru intenzity pole.

- Vodivý prostor mezi svorkami (póly) uvnitř zdroje tvoří vnitřní část obvodu. Symbol r představuje **vnitřní odpor zdroje**. Je to odpor vnitřní části obvodu BrA.

V této druhé části obvodu BrA se musí částice s kladným nábojem pohybovat od -B k +A, tedy proti směru intenzity pole. K tomu je ale potřeba vnějších neelektrických sil. Tyto síly konají práci na úkor nějaké energie, např. tepelné, chemické či mechanické. Elektrické zařízení, které tuto funkci plní nazýváme **elektrický zdroj**.

Elektrický zdroj je každé zařízení, ve kterém se mění jakákoli jiná energie v energii elektrickou. Zdroj tak udržuje v jednom místě trvalý nadbytek elektronů (záporný pól zdroje) a v druhém místě jejich trvalý nedostatek (kladný pól zdroje).

Elektrický zdroj tedy udržuje mezi svorkami (póly) konstantní potenciálový rozdíl, kterému říkáme **elektromotorické napětí U_e** .

Z definice napětí V 3.1.6.-2 víme, že napětí je rovno práci, potřebné k přemístění jednotkového náboje z jednoho místa pole do druhého ($U = W/Q$).

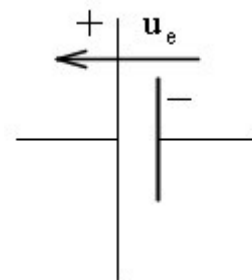
Elektromotorické napětí zdroje je číselně rovno práci, kterou vykonají neelektrické síly při přemístění jednotkového náboje z jednoho pólu na druhý (na našem obrázku z tělesa B na těleso A) proti silám pole.

Např. elektromotorické napětí baterie je 6 V nebo 6 J/C. To znamená, že pro přesun náboje $Q = 1 \text{ C}$ se přemění 6 J chemické energie v elektrickou.

Zdroji elektromotorického napětí mohou být baterie, generátory, sluneční články, palivové články, ale i živé organismy.

Zdroj budeme značit ve schématech tak, jak vidíte na obrázku

O 3.2.5.-3.



O 3.2.5.-3

Svorka zdroje o vyšším potenciálu (delší) se nazývá kladný pól (+), druhá svorka je záporný pól (-). „Směrem“ elektromotorického napětí (elektromotorické napětí je skalár !) budeme rozumět směr pohybu kladných nábojů uvnitř zdroje a označíme jej šipkou, která směřuje od záporného pólu ke kladnému.

T 3.2.5.-2

Když zapojíte na svorky zdroje voltmetr, měříte elektromotorické nebo svorkové napětí ?

Zopakujme si vztahy pro výkon proudu :

Podle V 3.2.4.-3 je $P = U \cdot I$

nebo $P = R \cdot I^2$

Dále je třeba vědět, že výkon je definován jako práce (energie) vykonaná za jednotku času.

Nyní se vraťme znovu k obrázku, viz. O 3.2.5.-2. Uzavřeným obvodem, který vidíte na obrázku, prochází proud I .

- **Zdroj** přeměňuje neelektrickou energii v elektrickou. Prochází-li uzavřeným obvodem s elektromotorickým napětím U_e stálý stejnosměrný proud I , vykoná zdroj práci, jejíž velikost je

$$U_e \cdot I \text{ za 1 sekundu}$$

- Do **vnější části** obvodu zdroj dodá energii, jejíž velikost je

$$R \cdot I^2 \text{ za 1 sekundu}$$

Co si myslíte o velikostech obou energií?

a) $U_e \cdot I = R \cdot I^2$

b) $U_e \cdot I > R \cdot I^2$

Pokud odpovídáte

- a) pak máte na mysli ideální zdroj. **Ideální zdroj** je takový, který neklade žádný odpor pohybu nosičům náboje uvnitř zdroje.

- b) máte pravdu. **Reálný zdroj** klade určitý odpor nosičům náboje pohybujícím se uvnitř zdroje.

- **Ztráta** energie na zdroji má velikost

$$r \cdot I^2 \text{ za 1 sekundu}$$

nebo jinak

$$U_e \cdot I - R \cdot I^2 = r \cdot I^2$$

V 3.2.5.-1

Rovnici V 3.2.5.-1 vydělíme proudem I

$$U_e = R \cdot I + r \cdot I$$

V 3.2.5.-2

U_e je elektromotorické napětí zdroje,

$R \cdot I$ je (podle Ohmova zákona) **svorkové napětí** U ,

$r \cdot I$ je úbytek napětí na vnitřní části obvodu (na zdroji).

Pokud obvodem neprotéká proud, vnitřní odpor zdroje se neprojeví, na svorkách zdroje je elektromotorické napětí U_e . Proto říkáme, že

elektromotorické napětí U_e je napětí na svorkách nepracujícího, nezatíženého zdroje, tj. na svorkách zdroje, ze kterého není odebírán proud.

Pokud na zdroj připojíme vnější odpor R , na svorkách zdroje je svorkové napětí U .

Svorkové napětí je napětí na svorkách pracujícího, zatíženého zdroje, tj. na svorkách zdroje, ze kterého je odebírán proud.

Z rovnice V 3.2.5.-2 plyne:

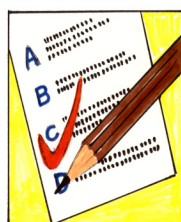
- proud, který prochází obvodem z obr. 3.2.5.-2 má velikost

$$I = U_e / (R + r)$$

V 3.2.5.-3

- svorkové napětí je při provozu vždy menší než elektromotorické, a to o úbytek napětí na vnitřní části obvodu.

Elektromotorické napětí zdroje a jeho vnitřní odpor jsou parametry zdroje, závislé na jeho konstrukci. Svorkové napětí se mění v závislosti na proudu, který ze zdroje odebíráme.



KO 3.2.5.-1. A nyní úvodní otázka. Když zapojíte na svorky zdroje voltmetr, měříte elektromotorické nebo svorkové napětí ?

- a) elektromotorické napětí
b) svorkové napětí

?

KO 3.2.5.-2. Uvažujte obvod, který se skládá ze zdroje a rezistoru odporu $R = 9 \Omega$. Vnitřní odpor zdroje je $r = 1 \Omega$. Obvodem prochází proud $I = 2 \text{ A}$. Jaký je celkový odpor obvodu ?

?

KO 3.2.5.-3. Uvažujte obvod, který se skládá ze zdroje a rezistoru odporu $R = 9 \Omega$. Vnitřní odpor zdroje je $r = 1 \Omega$. Obvodem prochází proud $I = 2 \text{ A}$. Jaké je elektromotorické napětí zdroje ?

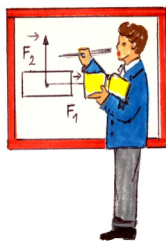
?

KO 3.2.5.-4. Uvažujte obvod, který se skládá ze zdroje a rezistoru odporu $R = 9 \Omega$. Vnitřní odpor zdroje je $r = 1 \Omega$. Obvodem prochází proud $I = 2 \text{ A}$. Vypočítejte svorkové napětí zdroje.

?

KO 3.2.5.-5. Uvažujte obvod, který se skládá ze zdroje a rezistoru odporu $R = 9 \Omega$. Vnitřní odpor zdroje je $r = 1 \Omega$. Obvodem prochází proud $I = 2 \text{ A}$. Jaký je úbytek napětí na zdroji ?

?



RU 3.2.5.-1. Elektromotorické napětí baterie v automobilu je 12 V . Připojíme-li k baterii elektrický obvod o vnějším odporu $5,5 \Omega$, prochází rezistorem proud 2 A . Určete svorkové napětí a vnitřní odpor baterie. Dále určete proud při zkratu.

Řešení: $U_e = 12 \text{ V}$, $R = 5,5 \Omega$, $I = 2 \text{ A}$, $U = ?$, $r = ?$, $I_z = ?$

Vycházíme z Ohmova zákona pro část obvodu. Rezistorem o odporu R prochází proud I . Svorkové napětí je $U = R \cdot I$

Dosadíme: $U = 2 \cdot 5,5 = 11 \text{ V}$

Pro celý uzavřený obvod platí $U_e = I(R + r)$

$$U_e = I \cdot R + I \cdot r$$

$$U_e = U + I \cdot r$$

a tedy pro vnitřní odpor zdroje můžeme psát $r = (U_e - U) / I$

Dosadíme: $r = (12 - 11) / 2 = 0,5 \Omega$

Spojíme-li svorky zdroje na krátký okamžik pouze spojovacím vodičem, nastane **spojení nakrátko** nebo-li **zkrat**. Vnější odpor R je téměř nulový a obvodem prochází **zkratový proud**.

Při zkratu prochází obvodem proud $I_z = U_e / r$

$$I_z = 12 / 0,5 = 24 \text{ A}$$

Svorkové napětí je 11 V , vnitřní odpor zdroje je $0,5 \Omega$, zkratový proud je 24 A .

RU3.2.5.-2. Dává-li baterie proud 3 A , je její svorkové napětí 24 V . Dává-li tato baterie proud 4 A , je její svorkové napětí 20 V . Vypočítejte elektromotorické napětí baterie a její vnitřní odpor.

Řešení: $I_1 = 3 \text{ A}$, $U_1 = 24 \text{ V}$, $I_2 = 4 \text{ A}$, $U_2 = 20 \text{ V}$, $U_e = ?$, $r = ?$

Dosadíme do vztahu V 3.2.5.-2.

Protože se jedná o tutéž baterii, je elektromotorické napětí a její vnitřní odpor v případě obou zapojení stejné:

pro první zapojení $U_e = 24 + 3 \cdot r$

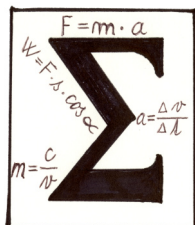
pro druhé zapojení $U_e = 20 + 4 \cdot r$

Vypočítejte vnitřní odpor $r =$

?

Nyní už můžete spočítat elektromotorické napětí. $U_e = ?$

?



Zdroj elektromotorického napětí udržuje napětí mezi svými svorkami. Aby ho udržel i při odběru proudu (při zatížení), musí být schopen konat práci při přemístění nosičů náboje. Velikost této práce na přemístění jednotkového náboje vnitřkem zdroje z jednoho pólu na druhý definuje elektromotorické napětí zdroje. Je-li R vnější odpor obvodu a r vnitřní odpor zdroje, platí

$$U_e = R \cdot I + r \cdot I$$

V 3.2.5.-2

U_e je **elektromotorické napětí** zdroje,

$I \cdot R$ je (podle Ohmova zákona) **svorkové napětí** U ,

$I \cdot r$ je úbytek napětí na vnitřní části obvodu (na zdroji).

3.2.6. Kirchhoffovy zákony



- naučit se řešit rozvětvený elektrický obvod
- vysvětlit pojmy: uzel, větev, smyčka
- umět formulovat I. a II. Kirchhoffův zákon
- umět řešit sériové a paralelní spojení rezistorů
- vysvětlit zapojení ampérmetru a voltmetru



3 hodiny



Elektromotorické a svorkové napětí. Ohmův zákon. Řešení soustavy rovnic.



T 3.2.6.-1

Zopakujme si nejprve základní pojmy. Sledujte schéma na O 3.2.6.-3

- Co je to uzel?

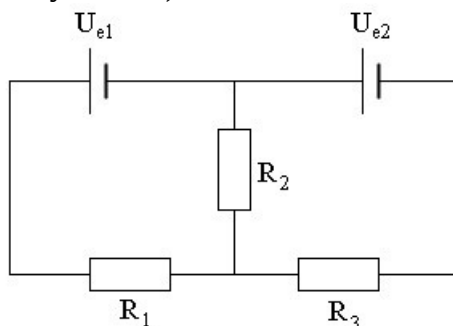
Uzel je místo vodivého spojení nejméně tří vodičů.

- Co je to větev?

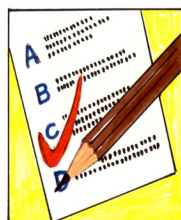
Větev je vodivé spojení dvou sousedních uzlů.

- Co je smyčka?

Když větve na sebe navazující vytvářejí uzavřený obvod, hovoříme o **smyčce** (někdy též nazývaná **jednoduchý elektrický obvod**).



O 3.2.6.-3



KO 3.2.6.-1. Kolik uzlů je ve schématu O 3.2.6.-3 ?
?

KO 3.2.6.-2. Kolik větví je ve schématu O 3.2.6.-3?
?

KO 3.2.6.-3. Kolik smyček najdete ve schématu O 3.2.6.-3?
?



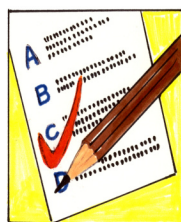
T 3.2.6.- 2

Pro řešení elektrických obvodů získáme potřebné rovnice užitím dvou zákonů - Kirchhoffových zákonů.

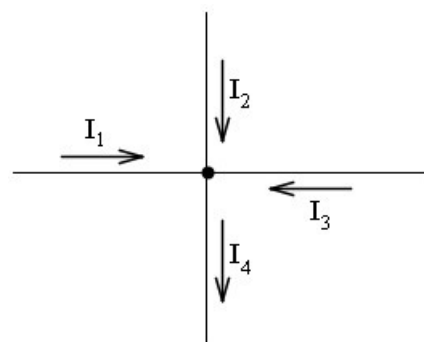
První Kirchhoffův zákon, zákon o uzlech, vychází ze zákona zachování elektrického náboje.

Součet proudů do uzlu vstupujících se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících.

Tento zákon můžete taky formulovat takto: Součet proudů v uzlu se rovná nule.



KO 3.2.6.-4. Na obrázku O 3.2.6.-6 je uzel A. Napište první Kirchhoffův zákon pro tento uzel.
?



O 3.2.6.-6

Druhý Kirchhoffův zákon je zobecněním Ohmova zákona pro uzavřenou smyčku.

Součet napětí na rezistorech je v uzavřené smyčce roven součtu elektromotorických napětí zdrojů zapojených ve smyčce.

Na O 3.2.6-7 máme jednoduchý uzavřený obvod. Celým obvodem prochází proud I .

- Pokud není zadán v úloze vnitřní odpor baterie, považujeme zdroj za ideální a druhý Kirchhoffův zákon zapíšeme takto:

$$I \cdot R = U_e$$

- Pokud máme v obvodu zapojen reálný zdroj s vnitřním odporem r , druhý Kirchhoffův zákon zapíšeme takto:

$$I \cdot R + I \cdot r = U_e$$

- Pokud máme zadáno svorkové napětí na zdroji U ($U = U_e - I \cdot r$), druhý Kirchhoffův zákon zapíšeme takto:

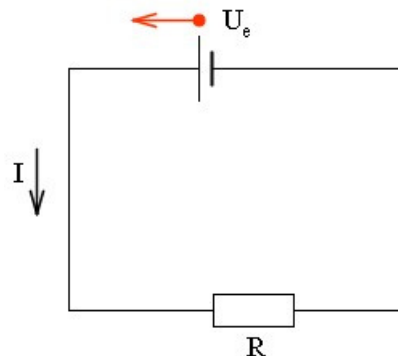
$$I \cdot R = U$$

- Na O 3.2.6.-8 máme zapojeny dva zdroje tak, že záporný pól jednoho zdroje je propojen s kladným pólem druhého zdroje. Jejich elektromotorická napětí jsou U_{e1} a U_{e2} , jejich vnitřní odpory jsou r_1 a r_2 . Druhý Kirchhoffův zákon zapíšeme takto:

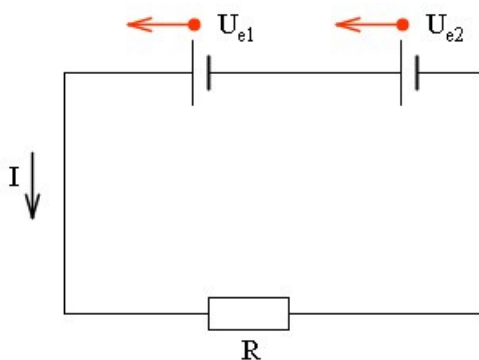
$$I \cdot R + I \cdot r_1 + I \cdot r_2 = U_{e1} + U_{e2}$$

- Na O 3.2.6.-9 máme zapojeny opět dva zdroje, ale „proti sobě“. Jejich elektromotorická napětí jsou U_{e1} a U_{e2} , jejich vnitřní odpory jsou r_1 a r_2 . Směr proudu nemůžeme určit, protože zadání je obecné. Pro směr, který je označen v obrázku druhý Kirchhoffův zákon zapíšeme takto:

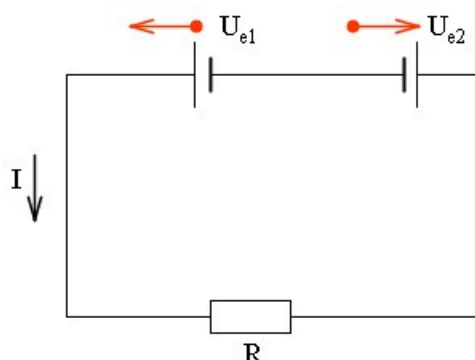
$$I \cdot R + I \cdot r_1 + I \cdot r_2 = U_{e1} - U_{e2}$$



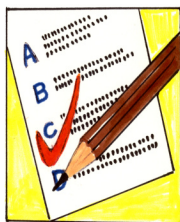
O 3.2.6-7



O 3.2.6.- 8



O 3.2.6.-9



KO 3.2.6.-5. Aby platila tato rovnice, tj. směr proudu odpovídal obr. 3.2.6.-9, musí platit

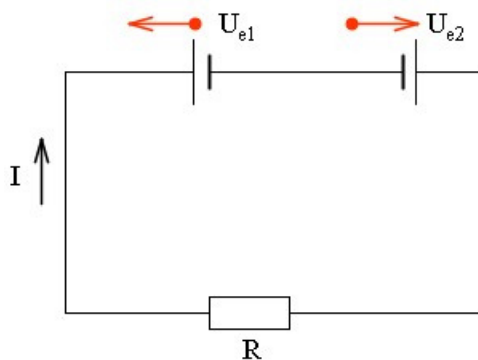
a) $U_{e1} < U_{e2}$

b) $U_{e1} > U_{e2}$

?

Pro opačný směr proudu jak vidíte ve schématu O 3.2.6.-10 budeme psát:

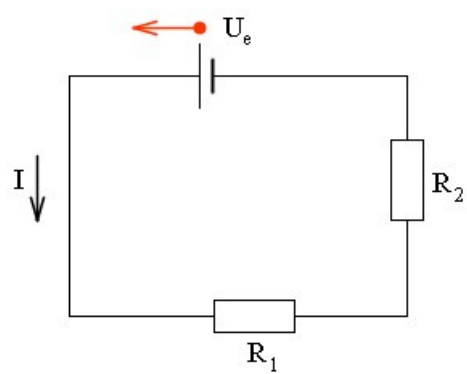
$$I \cdot R + I \cdot r_1 + I \cdot r_2 = -U_{e1} + U_{e2}$$



O 3.2.6.-10

KO 3.2.6.-6. Napište druhý Kirchhoffův zákon pro obvod na O 3.2.6.-11. Vnitřní odpor zdroje je r .

?



O 3.2.6.-11



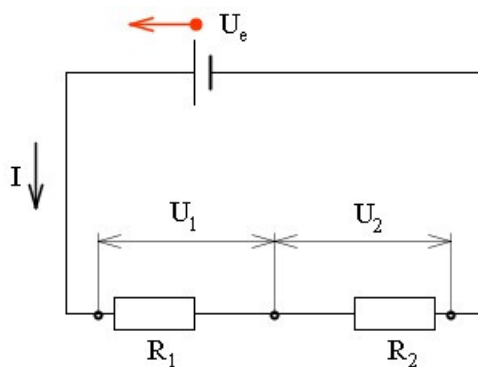
T 3.2.6.-3

Co platí při sériovém spojení rezistorů?

Sledujte schéma na O 3.2.6.-12. V obvodu jsou zapojeny dva rezistory na zdroj. Jejich odpory jsou R_1 a R_2 , svorkové napětí na zdroji je U .

- Kolik je v obvodu uzlů? $n =$

?



O 3.2.6.-12

Kdy jsou rezistory zapojeny do série?

Rezistory jsou zapojeny v sérii, pokud jsou zapojeny v jedné společné větvi, resp., pokud mezi nimi není uzel. V našem případě prochází oběma rezistory proud I .

Při sériovém zapojení prochází všemi rezistory stejný proud.

- Pokud neuvažujeme odpor vodičů, můžeme psát:

na rezistoru R_1 je napětí $U_1 = I.R_1$

na rezistoru R_2 je napětí $U_2 = I.R_2$

Podle II.Kirchhoffova zákona platí : $U_1 + U_2 = U$

Celkové napětí na sériové kombinaci rezistorů je rovno součtu napětí na jednotlivých rezistorech.

- Nahradíme sériovou kombinaci rezistorů R_1 a R_2 ve schématu O 3.2.6-12 rezistorem s odporem R_S . Napětí na něm je

$$U = I.R_S$$

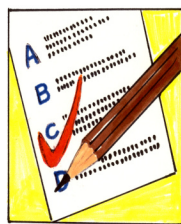
Rovnici a) můžeme zapsat takto:

$$I.R_1 + I.R_2 = I.R_S$$

a po úpravě dostaneme

$$R_S = R_1 + R_2$$

Výsledný odpor sériové kombinace rezistorů je roven součtu odporů jednotlivých rezistorů.



KO 3.2.6.-7. Ve schématu O 3.2.6.-12 je $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 15 \Omega$, $U = 100 \text{ V}$.

- Jak velký je celkový odpor obvodu?
- Jak velký proud prochází rezistorem R_1 ?
- Jak velký proud prochází rezistorem R_2 ?
- Na kterém rezistoru je větší napětí?
- Jaký je poměr napětí $U_1 : U_2$ na rezistorech R_1 a R_2 ?

?

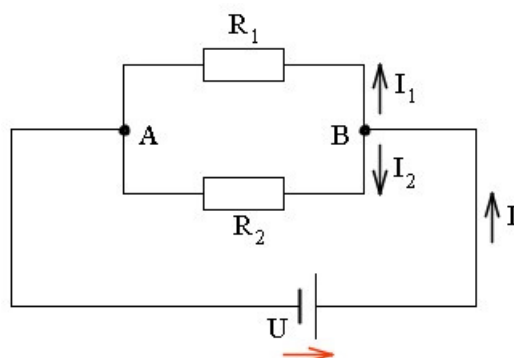


T 3.2.6.-4

Co platí při paralelním spojení rezistorů?

Sledujte schéma O 3.2.6-13. V obvodu jsou dva rezistory připojené paralelně ke zdroji. Jejich odpory jsou R_1 a R_2 , svorkové napětí zdroje je U .

Kolik je v obvodu uzlů ?
?



O 3.2.6-13

T 3.2.6.-5 Kolik je v obvodu větví ?
?

Větví (A, zdroj, B)..... prochází proud I , ten se v uzlu B dělí na dva proudy tak, že
větví (B, R_1 , A) prochází proud I_1
větví (B, R_2 , A)..... prochází proud I_2

- Je-li na zdroji svorkové napětí U , pak stejné napětí je mezi body A a B (pokud neuvažujeme odpor vodičů). Napětí U je tedy na obou rezistorech stejné.

Při paralelním zapojení rezistorů je napětí na každém z nich stejné a je rovno napětí, které je na celé paralelní kombinaci.

- Pro napětí na rezistorech tedy platí

$$U = I_1 \cdot R_1 \Rightarrow I_1 = \frac{U}{R_1} \quad \text{a)}$$

$$U = I_2 \cdot R_2 \Rightarrow I_2 = \frac{U}{R_2} \quad \text{b)}$$

Podle I.Krchhoffova zákona pro uzel B platí:

$$I = I_1 + I_2 \quad \text{c)}$$

Celkový proud, procházející kombinací paralelně zapojených rezistorů je roven součtu proudů procházejících jednotlivými rezistory.

- Pokud označíme výsledný odpor této paralelní kombinace R_p , potom proud I zapíšeme podle Ohmova zákona

$$I = \frac{U}{R_p} \quad \text{d)}$$

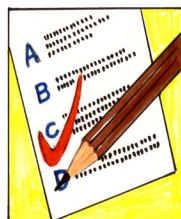
Do rovnice c) dosadíme rovnice a) b) d) :

$$\frac{U}{R_p} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

Vydělíme-li celou rovnici U , dostaneme:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Převrácená hodnota výsledného odporu paralelní kombinace rezistorů je rovna součtu převrácených hodnot odporů jednotlivých rezistorů.



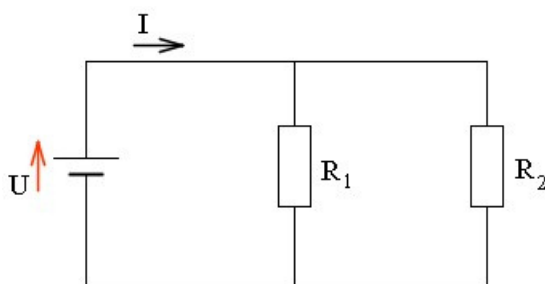
KO 3.2.6.-8. Ve schématu O 3.2.6.-14 je $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 15 \Omega$, $U = 60 \text{ V}$.

- Jak velký je celkový odpor obvodu?
- Jak velký je proud I ?
- Jak velký proud prochází rezistorem R_1 ?
- Jak velký proud prochází rezistorem R_2 ?

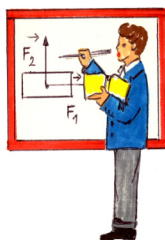
e) Na kterém rezistoru je větší napětí?

f) Jaký je poměr proudů $I_1 : I_2$, které procházejí rezistory R_1 a R_2 ?

?

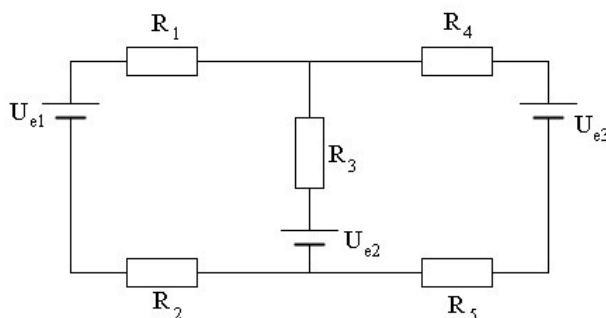


O 3.2.6.-14



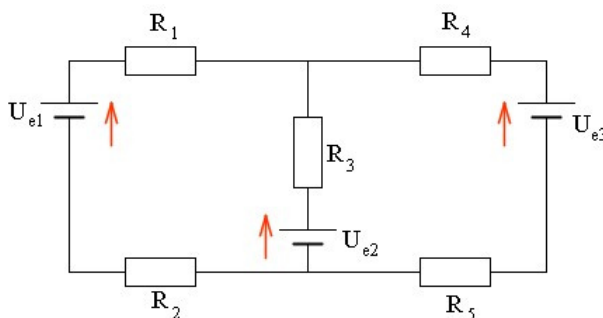
RU 3.2.6.-1. Na obrázku O 3.2.6-15a je obvod, jehož prvky mají hodnoty: $U_{e1} = 3,0 \text{ V}$, $U_{e2} = 6,0 \text{ V}$, $U_{e3} = 6,0 \text{ V}$, $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, $R_3 = 4 \Omega$, $R_4 = 2 \Omega$, $R_5 = 2 \Omega$. Určete velikost a směr proudu v každé ze tří větví.

Řešení:



O 3.2.6-15a

- Nejprve označíme směry proudů uvnitř zdrojů (O 3.2.6.-15b).



obr. 3.2.6.-15b

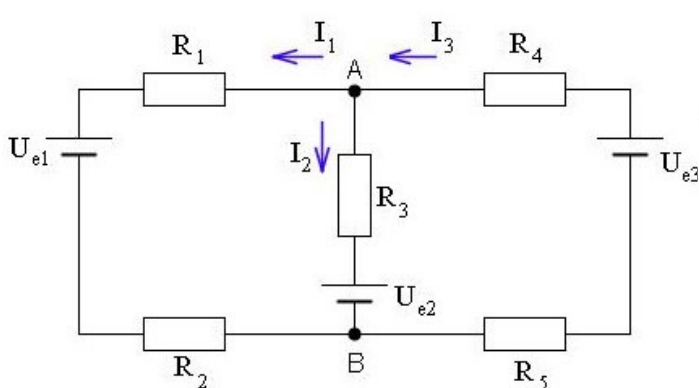
- Uzly označíme A,B. Dále zvolíme označení a směry proudů v jednotlivých větvích bez ohledu na to, že skutečné směry zatím neznáme.

Situaci vidíte na O 3.2.6.-15c:

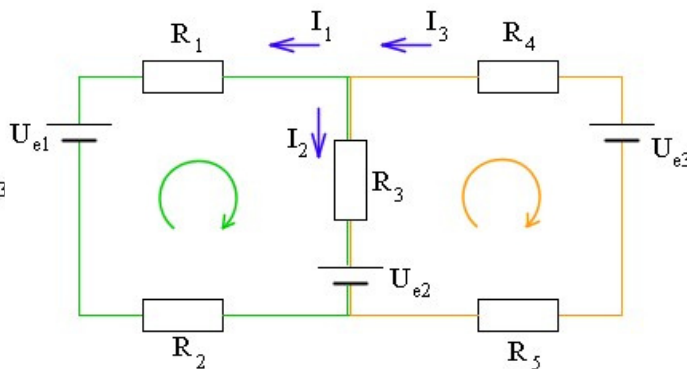
proud I_1 prochází větví A, R_1 , zdroj U_{e1} , R_2 , B

proud I_2 prochází větví A, R_3 , zdroj U_{e2} , B

proud I_3 prochází větví A, R_4 , zdroj U_{e3} , R_5 , B



O 3.2.6.-15c



O 3.2.6.-15d

- Máme tři proudy a tedy tři neznámé. Musíme sestavit tři rovnice. První rovnici získáme použitím I.Kirchhoffova zákona pro uzel A. Do uzlu A vstupuje proud I_3 , z uzlu vystupují proudy I_1 a I_2 .

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (\text{a})$$

Stejnou rovnici bychom dostali pro uzel B.

- Sledujte O 3.2.6.-15d. Při sestavování rovnic na základě II.Kirchhoffova zákona vybereme uzavřenou smyčku a zvolíme směr postupu. Tento směr volíme **libovolně**. **Nesmíme ale zapomenout**, že elektromotorická napětí orientovaná souhlasně se zvoleným směrem postupu a napětí na rezistorech, kde zvolený směr proudu souhlasí se zvoleným směrem postupu, píšeme s kladným znaménkem, v opačném případě se znaménkem záporným. Vybrali jsme si smyčku v levé části obvodu (je označena zeleně), zvolili jsme si směr postupu (zelená šipka) a podle II. Kirchhoffova zákona platí

$$-I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_2 = U_{e1} - U_{e2}$$

Do rovnice dosadíme numericky a po úpravě můžeme psát

$$-4I_1 + 4I_2 = -3 \quad (\text{b})$$

- Nyní si zvolíme sousední smyčku (je označena oranžově) v pravé části obr. 3.2.6.-15d a opět si zvolíme směr postupu (oranžová šipka) a podle II. Kirchhoffova zákona platí

•

$$-I_3 \cdot R_4 - I_3 \cdot R_5 - I_2 \cdot R_3 = U_{e2} - U_{e3}$$

Do rovnice dosadíme numericky a po úpravě můžeme psát

$$-I_2 - I_3 = 0 \quad (\text{c})$$

Máme tedy tři rovnice o třech neznámých

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (\text{a})$$

$$-4I_1 + 4I_2 = -3 \quad (\text{b})$$

$$-I_2 - I_3 = 0 \quad (c)$$

$$(c) \quad I_3 = -I_2$$

$$(a) \quad I_1 + 2I_2 = 0 \Rightarrow 4I_1 + 8I_2 = 0$$

$$(b) \quad -4I_1 + 4I_2 = -3$$

sečteme upravenou rovnici (a) s rovnicí (b) a dostaneme $I_2 = -0,25 \text{ A}$

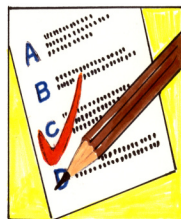
z rovnice (c) čteme

$$I_3 = 0,25 \text{ A}$$

z rovnice (a) čteme

$$I_1 = 0,5 \text{ A}$$

Z výsledku je patrné, že směry proudů I_1 a I_3 jsme volili správně, směr proudu I_2 bude opačný.



KO 3.2.6.-9. Když jsme vybírali uzavřené smyčky v RU3.2.6.-1., měli jsme kromě zelené a oranžové smyčky ještě jednu možnost. Víte, která to byla?
?



T 3.2.6.-6

Shrnutí na závěr.

Při řešení elektrického obvodu jsme několikrát volili libovolně:

- 1) Libovolně jsme zvolili směry proudů.
- 2) Libovolně jsme vybrali smyčky, pro které jsme psali rovnice.
- 3) Libovolně jsme zvolili směr, kterým jsme procházeli smyčkami.
- 4) Libovolně jsme zvolili počáteční a koncový bod při průchodu smyčkami.

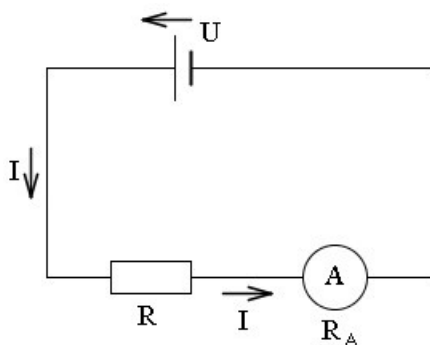
Nezapomeňme na dvě pravidla:

- 1) Každou zvolenou smyčku musíme **projít celou**.
- 2) Jakmile jsme jednou zvolili určitý směr některého proudu, **nesmíme ho změnit, dokud nevypočítáme číselné hodnoty všech proudů**. Zvolíme-li směr proudu obráceně, ve výsledku nás na to upozorní znaménko minus (-). Opravu provedeme vypuštěním znaménka minus a změnou orientace šipky znázorňující původní směr proudu. Tuto opravu však nesmíme provést dříve, než vypočítáme všechny proudy, resp. napětí.

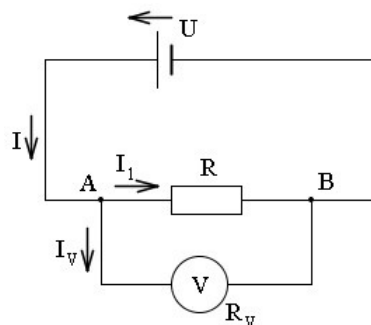
T 3.2.6.-7

Chcete měřit proud a napětí?

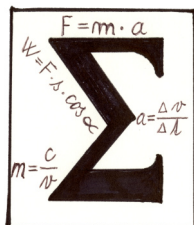
- Proud měříme **ampérmetrem**. Chcete-li změřit proud, který prochází rezistorem R na O 3.2.6.-22 musíte zapojit ampérmetr a rezistor **do série**. Jinými slovy – musíte obvod přerušit a vložit ampérmetr tak, aby proud procházel měřícím přístrojem. Je nutné, aby odpor ampérmetru R_A byl velmi malý ve srovnání s ostatními rezistory v obvodu. Jinak by přítomnost ampérmetru nezanedbatelně zmenšila měřený proud.
- Napětí (rozdíl potenciálů) měříme **voltmetrem**. Chcete-li změřit napětí na rezistoru R na O 3.2.6.-23, musíme zapojit voltmetr **paralelně** s rezistorem R . Voltmetr tedy připojíte mezi body A a B aniž přerušíte měřený obvod. Odpor voltmetru R_V musí být mnohem větší než odpor rezistoru tak, aby proud procházející voltmetrem byl zanedbatelný. V opačném případě by nezanedbatelně zmenšil měřené napětí.



O 3.2.6.-22



O 3.2.6.-23



Pro řešení elektrických obvodů musíme vědět, že

1) součet proudů vstupujících do uzlu je roven součtu proudů z uzlu vystupujících

2) součet napětí na jednotlivých rezistorech v uzavřené smyčce je roven součtu elektromotorických napětí zdrojů zapojených v této smyčce.

Tato dvě pravidla pro uzel a smyčku známe jako **Kirchhoffovy zákony**.

Rezistory můžeme zapojovat

- sériově
- paralelně

Výsledný odpor **sériové kombinace** rezistorů je roven součtu odporů jednotlivých rezistorů.

Prochází jimi stejný proud a celkové napětí, které je na celé sériové kombinaci je rovno součtu napětí na jednotlivých rezistorech.

Převrácená hodnota výsledného odporu **paralelní kombinace** rezistorů je rovna součtu převrácených hodnot odporů jednotlivých rezistorů. Na každém rezistoru je stejné napětí jako napětí na celé paralelní kombinaci a celkový proud procházející kombinací rezistorů je roven součtu proudů procházejících jednotlivými rezistory.

3.2.7. Vedení proudu v kapalinách



- vysvětlit pojem elektrolytu (disociace)
- znát nosiče elektrického proudu v elektrolytu (iontová vodivost)
- popsat procesy probíhající při vedení proudu v elektrolytu
- umět formulovat Faradayovy zákony
- popsat princip elektrochemického zdroje napětí (galvanický článek)
- vysvětlit princip Voltova článku
- umět popsat princip akumulátoru



2 hodiny



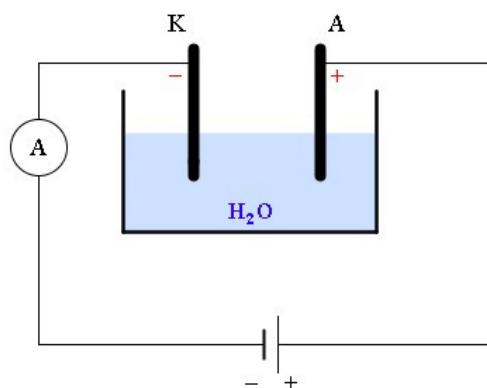
Definice proudu. Směr proudu. Elektromotorické a svorkové napětí zdroje.



T 3.2.7.-1

Je voda elektricky vodivá?

Na obrázku O 3.2.7.-1 vidíte schéma experimentu. Do obvodu zapojíme ampérmetr, zdroj napětí a vaničku s **destilovanou** vodou. Ampérmetr **neukáže** žádnou výchylku. Destilovaná voda je velmi špatný vodič elektrického proudu a stejně tak i většina kapalin v chemicky čistém stavu. Porovnejte si měrný odpor některých kapalin s měrným odporem kovových vodičů v tabulce na O 3.2.7.-2.



O 3.2.7.-1

<i>Látka</i>	<i>$\rho(\Omega m)$</i>
aceton	$1,4 \cdot 10^1$
destilovaná voda	$10^3 - 10^4$
olej transformátorový	$10^{11} - 10^{12}$
petrolej	10^{14}
stříbro	$1,47 \cdot 10^{-8}$
měď	$1,72 \cdot 10^{-8}$
hliník	$2,63 \cdot 10^{-8}$
železo	$10,0 \cdot 10^{-8}$

O 3.2.7.-2

Vraťme se k našemu experimentu. Pokud do vaničky s destilovanou vodou přidáme např. trochu kuchyňské soli, ampérmetr ukáže výchylku, roztokem bude procházet proud. Již velmi malé množství soli, kyseliny nebo zásady (několik miligramů na litr) zvýší vodivost roztoku až milionkrát, takže vodivost je dobrým měřítkem chemické čistoty vody.

Roztoky kyselin, solí a zásad vedou elektrický proud.

Chemické sloučeniny, jejichž roztoky jsou elektricky vodivé, se nazývají **elektrolyty**. Kovové vodiče, jimiž se proud do elektrolytu zavádí se nazývají elektrody. Elektroda spojená s kladným pólem zdroje je **anoda A**, elektroda spojená se záporným pólem zdroje je **katoda K**. Elektrický proud jdoucí roztokem elektrolytu má obdobné účinky jako proud v kovových vodičích. Například roztok se průchodem proudu zahřívá a platí Ohmův zákon. Avšak mechanismus vedení proudu v kapalinách je jiný než v kovech.

T 3.2.7.-2

- Vedení elektrického proudu **v kovech** je podmíněno usměrněným pohybem volných elektronů, které vznikly odtržením obvodových elektronů od atomů kovu. Atomy kovu se tak staly kladnými ionty. Kovy mají **vodivost elektronovou**. Kladné ionty jsou v kovu uspořádány v pevné krystalové mříži, mají pevné polohy, kolem kterých vykonávají jen

tepelný kmitavý pohyb a vedení proudu se neúčastní. Při vedení elektrického proudu **v kovech nedochází ke znatelnému pohybu látky a k chemickým změnám.**

- Vedení proudu **v elektrolytech** umožňují **ionty**, které vznikly rozštěpením molekul rozpuštěné látky. Děj, při kterém vlivem rozpouštědla nastává rozštěpení molekul rozpuštěné látky na ionty se nazývá **elektrolytická disociace**. Je to samovolný proces, který končí dosažením rovnovážného stavu, při němž jsou v roztoku přítomny vždy dva druhy iontů – **kationty** (kladně nabití ionty) a **anionty** (záporně nabití ionty).

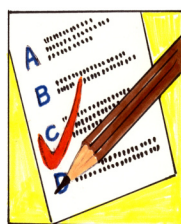
V roztoku vedou proud kladné a záporné ionty. Roztoky mají vodivost iontovou.

Příklad vzniku iontů v roztoku:

Vodný roztok síranu měďnatého $\text{CuSO}_4 \rightarrow$ kationty Cu^{2+} anionty SO_4^{2-}

Vodný roztok kyseliny sírové $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ kationty 2H^+ anionty SO_4^{2-}

Tavenina $\text{NaCl} \rightarrow$ kationty Na^+ anionty Cl^-



KO 3.2.7.-1. Kationty jsou přitahovány

a) ke katodě

b) k anodě

?

KO 3.2.7.-2. Anionty jsou přitahovány

a) ke katodě

b) k anodě

?

KO 3.2.7.-3. Aby došlo v roztoku k elektrolytické disociaci je nutné aby roztokem procházel proud ?

a) ano

b) ne

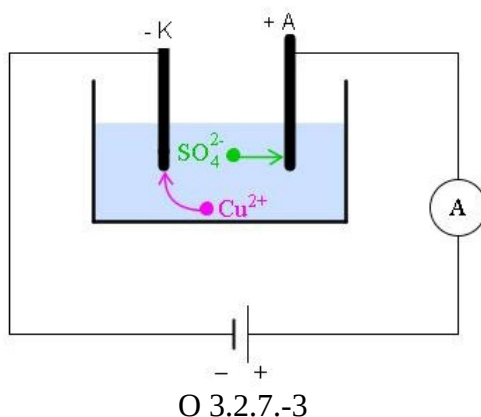
?



T 3.2.7.-3

Ve vaničce máme roztok síranu měďnatého, který obsahuje kladné ionty mědi Cu^{2+} a záporné ionty SO_4^{2-} . Do elektrolytu jsou vloženy měděné elektrody připojené na zdroj napětí. Schéma zapojení vidíte na O 3.2.7.-3. Elektrické pole mezi katodou a anodou způsobí usměrněný pohyb iontů elektrolytu. Kationty mědi Cu^{2+} se pohybují k záporné katodě, anionty

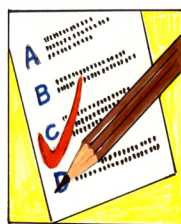
SO_4^{2-} se pohybují ke kladné anodě. Obvodem prochází elektrický proud. Kationty mědi Cu^{2+} přebírají z katody elektrony a vylučují se na ní jako neutrální atomy Cu. Anionty SO_4^{2-} reagují s materiálem anody a vytvářejí nové molekuly CuSO_4 . Z anody přechází do roztoku tolik atomů mědi, kolik se jich vylučuje na katodě. Koncentrace elektrolytu se nemění.



O 3.2.7.-3

Je třeba zdůraznit, že

- ionty se nevytvářejí v roztoku elektrolytu teprve tehdy, když se zavede proud, nýbrž jsou v něm stále obsaženy
- připojení zdroje na elektrody způsobí pouze jejich usměrněný pohyb
- ionty, které dospějí k elektrodám, se zde mění v neutrální atomy nebo skupiny atomů a přitom se vylučují nebo reagují s materiálem elektrod, popř. s elektrolytem
- **při vedení proudu v elektrolytu nastává spolu s přenosem elektrického náboje i přenos látky**
- průchod elektrického proudu roztokem elektrolytu je provázen chemickými ději, které nazýváme **elektrolýzou**.



KO 3.2.7.-4. Ve vodném roztoku ZnSO_4 vznikají disociací ionty zinku a SO_4 . Aby k tomuto procesu došlo

- a) je nutná přítomnost elektrod v elektrolytu
- b) není nutná přítomnost elektrod v elektrolytu

?

Aby došlo k usměrněnému pohybu těchto iontů směrem k elektrodám

- a) je nutné aby mezi elektrodami bylo napětí
- b) není nutné aby mezi elektrodami bylo napětí

?

Zinek se bude vylučovat na

- a) katodě
- b) anodě

?



T 3.2.7.-4

Kolik látky se vyloučí na elektrodě?

Elektrolytické vedení proudu studoval M. Faraday a odvodil dva zákony, které byly po něm pojmenovány.

První Faradayův zákon se zabývá závislostí mezi množstvím látky vyloučené na elektrodě a velikostí elektrického náboje.

Hmotnost látky vyloučené na kterékoliv elektrodě je přímo úměrná součinu stálého proudu a doby, po kterou proud elektrolytem procházel.

Zákon můžeme zapsat takto:

$$m = A \cdot I \cdot t$$

V 3.2.7.-1

m je hmotnost látky, která se vyloučí na elektrodě

I je proud, který prochází obvodem (a tedy i elektrolytem)

t je doba, po kterou proud obvodem procházel

A je konstanta, která je pro danou látku charakteristická a nazývá se **elektrochemický ekvivalent** látky. Jednotkou je $\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$. Například pro stříbro je $A = 1,118 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$. To znamená, že stálým proudem 1 A se za 1s vyloučí na katodě 1,118 mg stříbra.

Podle V 3.2.1.-2 je $Q = I \cdot t$

a tedy rovnici V 3.2.7.-1 lze zapsat takto:

$$m = A \cdot Q$$

V 3.2.7.-2

První Faradayův zákon můžeme (podle rovnice V 3.2.7.-2) interpretovat také takto:

Hmotnost látky vyloučené na kterékoliv elektrodě je přímo úměrná elektrickému náboji, který prošel elektrolytem.

Druhý Faradayův zákon zní:

Látková množství různých látek vyloučených při elektrolýze týmž nábojem jsou chemicky ekvivalentní.

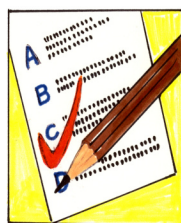
Zákony Faradayovy platí velmi přesně. Z rovnice V 3.2.7.-1 plyne, že

$$I = \frac{m}{A \cdot t}$$

Touto cestou byla dříve definována jednotka proudu ampér jako proud, který z roztoku dusičnanu stříbrného vyloučí za 1 sekundu 1,118 mg stříbra. Dnes se pro definici jednotky proudu využívá jiných fyzikálních zákonů se kterými se seznámíme později.

Vylučování kovů na katodě při elektrolýze se užívá

- v **elektrometalurgii** k výrobě nebo čištění kovů
- v **galvanostegii** ke galvanickému pokovování (povlaky do 0,01 mm)
- v **galvanoplastice** ke galvanickému pokovování (povlaky až několik mm), ke zhotovování přesných lisovacích forem
- v **polarografii** ke zjišťování množství a druhu prvků ve sloučeninách



KO 3.2.7.-5. Dívejte se na O 3.2.7.-3. V jednom případě máme ve vaničce roztok H_2SO_4 a v druhém případě roztok AgNO_3 . Elektrochemické ekvivalenty jsou: vodík $A = 0,1045 \text{ mg} \cdot \text{C}^{-1}$, stříbro $A = 1,118 \text{ mg} \cdot \text{C}^{-1}$.

Vodík se vylučuje na

- a) katodě
- b) anodě

?

Stříbro se vylučuje

- a) na katodě
- b) na anodě

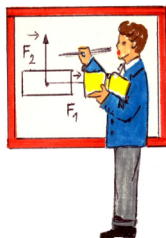
?

Kolik mg stříbra se vyloučí za 2 sekundy, projde-li roztokem proud 10 A?

?

Kolik mg vodíku se vyloučí, projde-li roztokem náboj 20 C ?

?



RU 3.2.7.-1.

Dvě elektrolytické nádoby spojené sériově obsahují roztoky AgNO_3 a CuSO_4 . Jejich elektrochemické ekvivalenty jsou : stříbro $A = 1,118 \text{ mg.C}^{-1}$, měď $A = 0,3294 \text{ mg.C}^{-1}$.

Za určitou dobu se v první nádobě vyloučilo 180 mg stříbra. Určete hmotnost mědi, která se za stejnou dobu vyloučila při elektrolýze v druhé nádobě.

Řešení : $m_{\text{Ag}} = 180 \text{ mg}$ $A_{\text{Ag}} = 1,118 \text{ mg.C}^{-1}$ $A_{\text{Cu}} = 0,3294 \text{ mg.C}^{-1}$

Protože obě nádoby jsou zapojeny v sérii, prochází oběma stejný proud I . Podle zadání prochází proud oběma vanami po stejnou dobu t , tedy součin $(I.t)$ je pro obě vany konstantní. Při elektrolýze v první vaně se vyloučí 180 mg stříbra a z rovnice V 3.2.7.-1 plyne

$$m_{\text{Ag}} = A_{\text{Ag}} . I.t \text{ a tedy } I.t = m_{\text{Ag}} / A_{\text{Ag}}$$

Pro vyloučenou měď bude platit podobná rovnice

$$m_{\text{Cu}} = A_{\text{Cu}} . I.t \text{ a tedy } I.t = m_{\text{Cu}} / A_{\text{Cu}}$$

Protože součin $(I.t)$ je pro obě elektrolýzy konstantní, můžeme psát

$$m_{\text{Ag}} / A_{\text{Ag}} = m_{\text{Cu}} / A_{\text{Cu}}$$

Pro hledanou hmotnost mědi tedy platí

$$m_{\text{Cu}} = A_{\text{Cu}} . m_{\text{Ag}} / A_{\text{Ag}}$$

Dosadíme: $m_{\text{Cu}} = 0,3294 \text{ mg.C}^{-1} . 180 \text{ g} / 1,118 \text{ mg.C}^{-1} = 53 \text{ g}$



T 3.2.7.-5

Elektrochemický článek jako zdroj elektromotorického napětí.

Elektrochemické články můžeme rozdělit do dvou skupin:

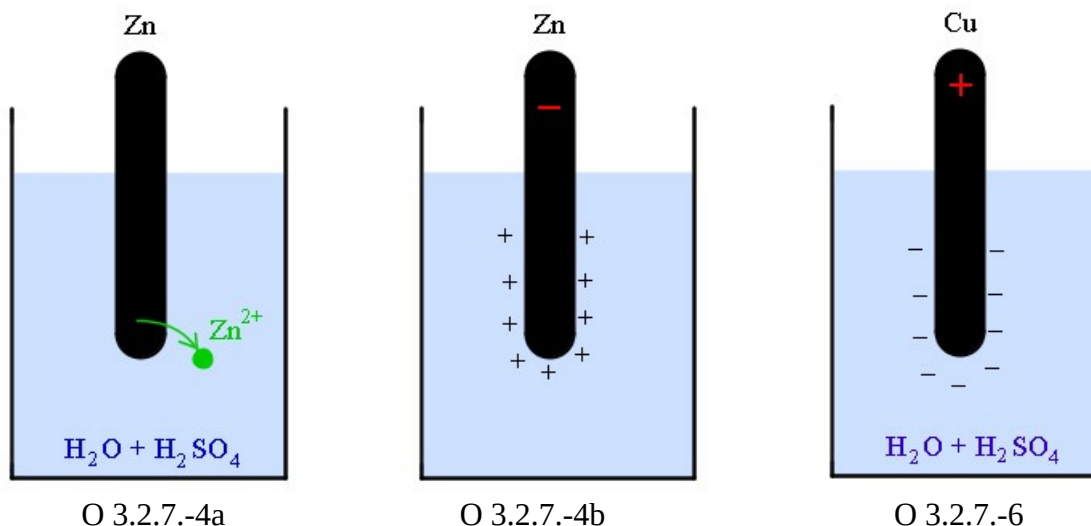
- galvanické články (primární články), které obsahují látky pro chemické reakce již při sestavování.
- akumulátory (sekundární články), ve kterých se látky pro

chemické reakce vytvářejí předchozí elektrolýzou.

Galvanický článek bezprostředně mění chemickou energii v elektrickou. Hlavní část článku tvoří elektrody, na nichž vznikají chemické reakce v elektrolytu.

A právě tyto chemické reakce jsou příčinou elektromotorického napětí článku. Všimněme si nyní příčin vzniku elektromotorického napětí.

Kovy, jak již bylo řečeno, obsahují vedle neutrálních atomů též volné elektrony a tedy i kladně nabitě ionty. Na obrázku O 3.2.7.-4a je ponořena zinková deska do roztoku kyseliny sírové.



Z destičky se začnou uvolňovat kladné ionty (kationty) zinku Zn^{2+} a v destičce tak získávají převahu záporné náboje elektronů. Destička se nabíjí záporně. Tento děj, který po ponoření destičky probíhá ze začátku rychle, se zvolňuje, až nakonec ustane. Kladné ionty zinku se nerozptýlí do vody, protože jsou zápornou destičkou přitahovány zpět k povrchu kovu a zabraňují dalším iontům vstupovat do roztoku. Kationty zinku v roztoku a povrch kovu vytvářejí v rovnovážném stavu dvojvrstvu kladných a záporných nábojů jak vidíte na O 3.2.7.-4b. K rozpouštění zinkové destičky by docházelo i v případě, že by destička byla ponořena do jiného elektrolytu, nebo jen do vody. Výsledky by se od popsaného případu lišily pouze kvantitativně, nikoliv kvalitativně.

<i>Elektroda</i>	<i>potenciál elektrody (V)</i>
Na	-2,71
Al	-1,7
Zn	-0,76
Fe	-0,44
Cu	+0,34
Ag	+0,80
Au	+1,5

O 3.2.7.-5

Napětí, které se vytváří při chemických reakcích mezi povrchem kovu a elektrolytem, je **elektrolytický potenciál**. Jde o charakteristické napětí pro danou dvojici elektroda – elektrolyt. Tento elektrolytický potenciál nejde přímo měřit. Můžeme však stanovit relativní hodnoty elektrolytického potenciálu měřeného kovu vzhledem k téže srovnávací elektrodě. Najdete je v tabulkách. Relativní hodnoty elektrolytického potenciálu nám úplně postačí, neboť v praxi se počítá s rozdíly potenciálů dvou elektrod. Hodnoty relativních elektrolytických potenciálů pro některé látky vidíte v tabulce, viz. O 3.2.7.-5. Všimněte si, že některé kovy mají elektrolytický potenciál záporný. To znamená, že tyto kovy se nabíjejí vzhledem k roztokům záporně. Jiné kovy (tzv. „ušlechtlejší“) s menší rozpouštěcí schopností se nabíjejí vzhledem k roztokům kladně a jejich elektrolytický potenciál je kladný jak vidíte na O 3.2.7.-6. Různou kombinací elektrod a elektrolytů můžeme získat různé typy galvanických článků.

T 3.2.7.-6

Nejjednodušší a nejstarší typ galvanického článku je **Voltův článek**, který tvoří zinková a měděná elektroda, elektrolytem je zředěná kyselina sírová.

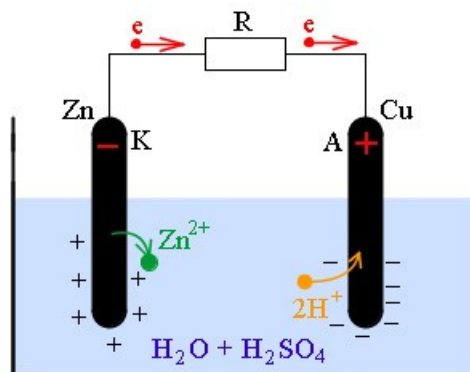
Jak velké je elektromotorické napětí mezi elektrodami u Voltova článku?

V tabulce O 3.2.7.-5 si zjistíme relativní elektrolytické potenciály pro zinek a elektrolyt (-0,76 V) a pro měď a tentýž elektrolyt (+0,34 V). Napětí mezi elektrodami je

$U_e = 0,34 - (-0,76) = 1,1$ V. Jde o napětí na svorkách nezátíženého zdroje, tedy elektromotorické napětí.

Zinková elektroda tvoří záporný pól a měděná elektroda kladný pól Voltova článku. Jestliže k tomuto článku připojíme spotřebič, obvodem prochází elektrický proud. Napětí na svorkách zatíženého zdroje poklesne na svorkové napětí. Velikost svorkového napětí bude záviset na odporu R spotřebiče.

Ve **vnější části obvodu** je proud tvořen usměrněným pohybem **elektronů**. Elektrony přecházejí od záporné zinkové elektrody k měděné elektrodě (O 3.2.7.-7).



O 3.2.7.-7

Když jsme v T 3.2.5.-1 vysvětlovali funkci zdroje napětí, sledovali jsme obrázek O 3.2.5.-1. Těleso A jsme nabili kladně, těleso B záporně a vodič jsme je spojili přes žárovku. Jakmile začne procházet žárovkou proud, vodiče A a B se vybíjejí. Pokud chceme, aby žárovkou procházel trvale proud, musíme zajistit, aby náboje na tělesech A a B neklesaly. A tuto funkci plní zdroj elektrického napětí.

Jak tomu bude u Voltova článku ?

Jakmile začne vnějším obvodem (rezistorem R) procházet proud - začne klesat záporný náboj zinkové desky stejně, jako kladný náboj měděné desky

ALE

tím se **poruší rovnovážný stav** mezi zinkovou deskou a elektrolytem stejně, jako mezi měděnou deskou a elektrolytem.

Co se děje na elektrodách?

KATODA Zn -

Do roztoku zředěné kyseliny sírové přecházejí další kladné ionty zinku tak, aby záporný náboj zinkové elektrody zůstal konstantní.

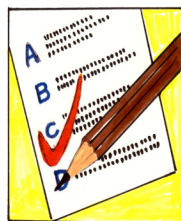
ANODA Cu +

Kladné vodíkové ionty obsažené v elektrolytu přibírají na měděné anodě elektrony tak, aby kladný náboj měděné desky zůstal konstantní.

V důsledku toho se elektrolytické potenciály obou elektrod nemění a elektromotorické napětí článku je konstantní.

Ve skutečnosti je celý proces poněkud složitější.

1. Například u Voltova článku kladné ionty zinku, které opouští zinkovou desku, reagují s ionty SO_4^{2-} a vzniká síran zinečnatý. Kladné vodíkové ionty, které přibírají elektrony na měděné desce se mění na neutrální částice a vylučují se na elektrodě. Těmito ději se článek postupně znehodnocuje.
2. Prochází-li obecně elektrolytem proud, mění se v důsledku elektrolýzy povrchy elektrod. Povrch elektrod se pokrývá vyloučenými produkty, mění se jeho kvalita, vznikají nové elektrické dvojvrstvy. Říkáme že elektrody se **polarizují** a jev se nazývá **elektrolytická polarizace**, která velmi ovlivňuje elektromotorické napětí článku. Technickými úpravami se dá vliv polarizace omezit.



KO 3.2.7.-6. Jaký je směr proudu ve vnější části obvodu, tj. katoda – rezistor – anoda na O 3.2.7.-7 ?

a) od katody k anodě, tj. Zn deska – rezistor – Cu deska

b) od anody ke katodě, tj. Cu deska – rezistor – Zn deska
?

KO3.2.7.-7. Jaké by bylo napětí článku kdybychom použili zinkovou a železnou desku ?
?

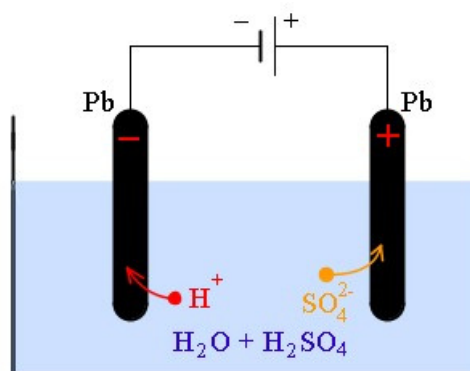
KO3.2.7.-8. Jaké by bylo napětí Voltova článku kdybychom použili místo měděné desky druhou zinkovou desku ?
?



T 3.2.7.-7

Jak je tomu u olověného akumulátoru? Ten má přece obě elektrody stejné.

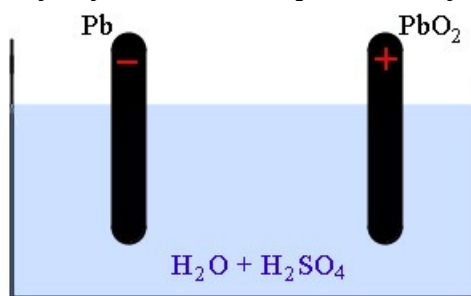
Dvě olověné desky jsou umístěné ve vodném roztoku kyseliny sírové H_2SO_4 . Desky reagují s kyselinou a pokryjí se síranem olovnatým PbSO_4 . Stejně elektrické dvojvrstvy mají stejný elektrický potenciál a proto je mezi nimi nulové elektromotorické napětí. Když k deskám **připojíme vnější zdroj** stejnosměrného napětí, nastává proces **nabíjení** akumulátoru (O 3.2.7.-8).



O 3.2.7.-8

- Záporné ionty SO_4^{2-} se pohybují k anodě, odevzdají jí náboj a přeměňují síran olovnatý na PbO_2 .
- Kladné ionty H^+ se pohybují ke katodě, kde přebírají elektrony a redukují síran olovnatý na olovo.

Mezi anodou pokrytou PbO_2 a katodou pokrytou olovem naměříme elektromotorické napětí 2,75 V. Vznikl sekundární zdroj stejnosměrného napětí – **nabitý akumulátor** (O 3.2.7.-9).



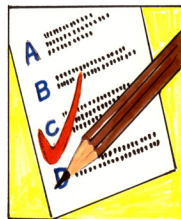
O 3.2.7.-9

Při připojení nabitého akumulátoru ke spotřebiči nastává proces vybíjení akumulátoru. Obě elektrody se pokrývají postupně síranem olovnatým (návrat do počátečního stavu) a tím rychle klesá napětí z hodnoty 2,75 V na 2,1 V. Na této hodnotě se dlouho udržuje. Potom opět klesá a při dosažení hodnoty 1,85 V se musí akumulátor znovu nabít připojením na vnější zdroj stejnosměrného napětí.

Jednotlivé články olověných akumulátorů se spojují do série do akumulátorových baterií 6 V, 12 V nebo 24 V. Vnitřní odpor olověných akumulátorů je řádově $10^{-2} \Omega$.

Schopnost akumulátoru akumulovat (nashromáždit) náboj vyjadřuje **kapacita akumulátoru**

(nezaměňovat s kapacitou kondenzátoru). Určuje se celkovým nábojem, který je akumulátor schopen vydat do vnějšího obvodu při vybíjení z napětí 2,75 V na 1,85 V. Kapacita akumulátoru se udává v ampérhodinách (A.h). Olověné akumulátory mají kapacitu od 10 A.h do 250 A.h. Využitelná kapacita akumulátoru klesá s klesající teplotou.



KO 3.2.7.-9. Jeden článek akumulátoru má elektromotorické napětí 2,05 V. Jaké je elektromotorické napětí baterie, která je tvořena šesti stejnými články zapojenými do série (tj. kladnou svorku jednoho článku vodivě spojíme se zápornou svorku druhého)?

?

KO 3.2.7.-10. Jeden článek akumulátoru má vnitřní odpor $5,3 \cdot 10^{-3} \Omega$. Jaký je vnitřní odpor baterie, která je tvořena šesti stejnými články zapojenými do série ?

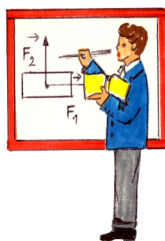
?

KO 3.2.7.-11. Kapacita akumulátoru je 40 A.h. Jak dlouho můžete z tohoto zdroje odebírat proud 16 A (bez dobíjení)?

?

Jak velký náboj (v coulombech) odeberete ze zdroje za tuto dobu ?

?



RU 3.2.7.-2. Autobaterie s elektromotorickým napětím 12 V a vnitřním odporem $0,03 \Omega$ je zatížena při používání startéru proudem 120 A. Vypočítejte svorkové napětí zdroje.

Řešení : $U_e = 12 \text{ V}$, $r = 0,03 \Omega$, $I = 120 \text{ A}$

Podle V 3.2.5.-2 platí $U_e = R \cdot I + r \cdot I$

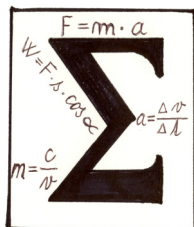
kde součin $I \cdot R$ představuje svorkové napětí zdroje U . Pro svorkové napětí tedy platí

$$U = U_e - I \cdot r$$

a po dosazení

$$U = 12 - 120 \cdot 0,03$$

$$U = 8,4 \text{ V}$$



Roztoky kyselin, solí a zásad vedou elektrický proud. Nejdřív ale musí dojít k **disociaci**, tj. rozpadu molekul zmíněných látek na kladné kationty a záporné anionty. Tyto kladné a záporné ionty vedou proud v kapalinách. Při vedení proudu v elektrolytu nastává **spolu s přenosem elektrického náboje i přenos látky**. Hmotnost látky vyloučené na elektrodě vypočítáme podle Faradayova zákona

$$m = A \cdot I \cdot t$$

V 3.2.7.-1

m je hmotnost látky, která se vyloučí na elektrodě,

I je proud, který prochází obvodem (a tedy i elektrolytem),

t je doba, po kterou proud obvodem procházel,

A je elektrochemický ekvivalent látky.

Elektrochemické články jako zdroje elektromotorického napětí můžeme rozdělit do dvou skupin:

- galvanické články (primární články)
- akumulátory (sekundární články).

Galvanický článek bezprostředně mění chemickou energii v elektrickou. Různou kombinací elektrod a elektrolytů můžeme získat různé typy galvanických článků.

Voltův článek má měděnou a zinkovou elektrodu a elektrolytem je zředěná kyselina sírová.

Akumulátor je tzv. sekundární galvanický článek. Olověný akumulátor má dvě olověné elektrody a elektrolytem je zředěná kyselina sírová. Akumulátor musíme nejprve nabít, tj. připojit jeho elektrody k vnějšímu zdroji. Následkem chemických reakcí má nabitý akumulátor mezi anodou pokrytou PbO_2 a katodou pokrytou olovem elektromotorické napětí 2,75 V. Celkový náboj, který je akumulátor schopen vydat do vnějšího obvodu při vybíjení (z 2,75 V na 1,85 V) definuje kapacitu akumulátoru.

3.2.8. Elektrický proud v plynech a ve vakuu



- vysvětlit za jakých podmínek se plyn stane vodivým
- umět vysvětlit pojmy ionizace a rekombinace
- znát nosiče nábojů v plynu a popsat jejich vznik, tj.
- uvolňování elektronů z kovu (termoemise, fotoemise, studená emise)
- vznik volných nositelů náboje vlivem ionizačních činidel (tepelná ionizace, ionizace zářením)
- umět vysvětlit co je nesamostatný výboj, ionizace nárazem, samostatný výboj
- popsat tři druhy samostatného výboje za atmosférického tlaku : obloukový výboj, jiskrový výboj a korona



2 hodiny



Jednotka elektronvolt (eV). Práce, kterou konají síly pole.



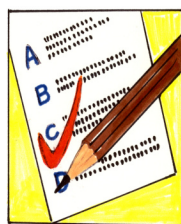
T 3.2.8.-1

Elektrický proud v látkách je podmíněn, jak už víme, usměrněným pohybem volných elektricky nabitých částic (elektronů a iontů). V **plynech** se účastní vedení proudu jak **ionty**, tak i **elektrony**. Vakuum se projevuje jako velmi dobrý izolant. Rovněž plyny jsou za obvyklých podmínek nevodiči elektrického proudu.

Znatelný průchod proudu ve vakuu nebo v plynném prostředí může nastat teprve tehdy, když se tam nějakým způsobem zvýší počet volných nositelů náboje. To je možné provést v podstatě dvojím způsobem :

- Volné nositele náboje vznikají působením cizího zdroje. V tomto případě hovoříme o **nesamostatném vedení proudu**.
- Volné nositele náboje vznikají v potřebné koncentraci při výboji. V tomto případě hovoříme o **samostatném vedení proudu**.

Elektricky vodivými se plyny stanou **ionizací**. Je to děj, při kterém se vnějším zásahem z molekuly plynu uvolňují elektrony a zbytek molekuly tvoří kladný iont. Elektrony se mohou také zachytit na neutrální molekule a vznikne záporný iont. Současně s ionizací plynu probíhá **rekombinace iontů**. Je to děj, při kterém opačně nabité ionty, popřípadě kladné ionty a elektrony se spojují v neutrální atomy či molekuly. Převládá-li ionizace, zvyšuje se počet ionizovaných molekul, a tím i vodivost plynu. Převládá-li rekombinace, plyn ztrácí elektrickou vodivost.



KO 3.2.8.-1. Jaké částice vznikají ionizací ?
?

KO 3.2.8.-2. Co vzniká rekombinací?
?



T 3.2.8.-2

Jak tedy učinit plyn (vakuum) vodivým?

Aby se plyn stal vodivým, musíme nositele náboje :

1. buď do něho vnést,
2. nebo je v něm vyvolat.

1. Uvolňování elektronů z kovu.

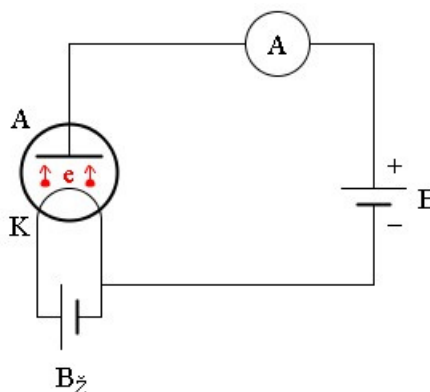
Aby mohly být volné elektrony uvolněny z kovu, je nutné vykonat práci proti přitažlivým silám, které zabraňují jejich uvolnění. Tato práce se nazývá **výstupní práce W_V** . Výstupní práce se obvykle udává v elektronvoltech ($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) a je nutné ji vykonat, **at' je elektron uvolněn z kovu jakýmkoliv způsobem**. Výstupní práce některých kovů vidíte v tabulce viz. O 3.2.8.-1. Energii potřebnou k uvolnění z kovu mohou získat elektrony různým způsobem.

• Termoemise (tepelná emise)

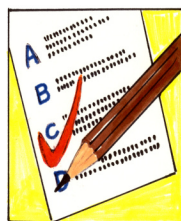
V tomto případě dochází k emisi elektronů v důsledku zvýšené teploty kovu. Elektrony získávají energii W_V ve formě energie tepelné. Na obrázku O 3.2.8.-2 vidíte vakuovou elektronku, tj. vyčerpanou trubici ve které jsou zataveny dvě elektrody. Katoda K je připojena na zápornou svorku a anoda A na kladnou svorku baterie B. Katoda je žhavana elektrickým proudem z baterie B_z . Rozžhavená katoda vysílá (emituje) elektrony, které jsou kladnou anodou přitahovány a obvodem prochází proud.

Kov	W_v (eV)
cesium	1,81
vápník	3,20
molybden	4,15
wolfram	4,54
platina	5,4

O 3.2.8.-1



O 3.2.8.-2



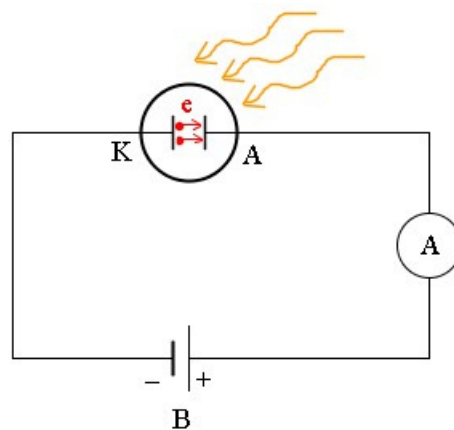
KO 3.2.8.-3. Vyjádřete výstupní práci molybdenu v joulech.
?

KO 3.2.8.-4. Bude ampérmetr na O 3.2.8.-2 ukazovat proud v případě, že katoda bude připojena ke kladnému a anoda k zápornému pólu zdroje B?
?

• Fotoemise

V tomto případě dochází k uvolňování elektronů z kovu působením světla vhodné frekvence. Elektrony získají energii W_v ve formě energie světelné. Na O 3.2.8.-3 vidíte fotonku. Jde opět o vyčerpanou trubici ve které jsou zataveny dvě elektrody. Katoda K je připojena k zápornému a anoda A ke kladnému pólu zdroje B. Pokud na katodu dopadá světlo vhodné frekvence ampérmetr bude ukazovat výchylku. Elektrony získají v tomto případě energii W_v ve formě energie světelné, budou emitovat z katody a budou přitahovány ke kladné anodě. Obvodem bude procházet proud. Pokud přestane dopadat na katodu světlo, proud v obvodu klesne na nulu. Fotoemise se využívá např. v regulační technice.

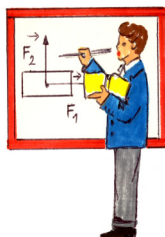
O tomto ději budete podrobně hovořit v optice.



O 3.2.8.-3

• Studená emise

Ze studené katody lze uvolnit elektrony též působením elektrického pole o velké intenzitě (řádově $10^8 - 10^{10} \text{ V.m}^{-1}$). Tento jev lze vysvětlit jen pomocí zákonů kvantové mechaniky.



RU 3.2.8.-1. Vypočítejte napětí mezi anodou a katodou ve vakuové trubici, jestliže elektron emitovaný z katody měl při dopadu na anodu rychlost $15\,000 \text{ km.s}^{-1}$.

Řešení: $v = 15\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1} = 1,5\cdot 10^7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, hmotnost a náboj elektronu najdete v tabulce konstant.

Podobnou úlohu jsme již řešili v RU 3.1.6.-4. . Ze vztahu V 3.1.6.-2 plyne, že síly pole vykonají práci

$$W = Q \cdot U$$

a elektron získá kinetickou energii

$$E_k = m \cdot v^2 / 2$$

Porovnáním obou rovnic dostaneme

$$U = m \cdot v^2 / (2 \cdot Q)$$

Dosadíme:

$$U = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,5^2 \cdot 10^{14} / (2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) = 640\text{ V}$$



T 3.2.8.-3

2. Vznik volných nositelů náboje vlivem ionizačních činidel.

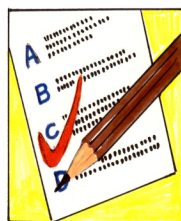
Zatímco v předchozím případě (uvolňování elektronů z kovu) přicházely nositelé náboje (elektrony) do plynu z jedné elektrody, nyní nositelé náboje (elektrony, kladné a záporné ionty) vznikají z neutrálních molekul plynu. Prostředky, kterými se vyvolává ionizace plynu, nazýváme **ionizátory**. Jsou jimi takové zdroje energie, které dodají elektronům v atomech (molekulách) plynu energii potřebnou na jejich uvolnění. Tuto energii nazýváme **ionizační energie** (např. pro vodík je to 13,5 eV , pro kyslík 15,6 eV) a může být dodána plynu různým způsobem.

- **Tepelná ionizace**

Rychlost tepelného pohybu molekul plynu roste s teplotou. Zahříváme-li plyn (plamenem, topnou spirálou), roste počet srážek rychle se pohybujících molekul, které mají za následek ionizaci plynu.

- **Ionizace zářením**

Energii potřebnou k ionizaci neutrálních molekul plynu, může dodat také elektromagnetické záření. Pro ionizaci je vhodné záření o vysoké frekvenci – ultrafialové, rentgenové, gama a kosmické.

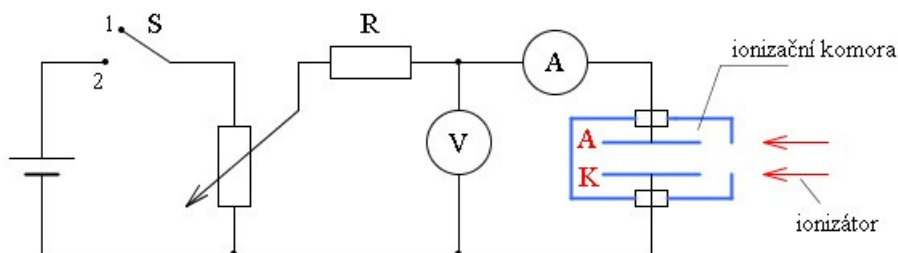


KO 3.2.8.-5. Kondenzátor se vzduchovým dielektrikem se při přiblížení plamene rychle vybíjí. Proč ?



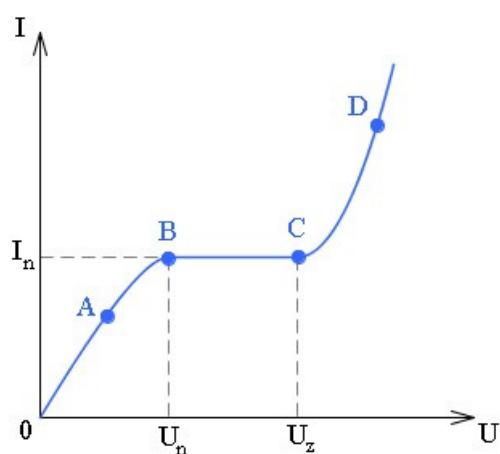
T 3.2.8.-4

Na O 3.2.8.-4 vidíte zapojenou ionizační komoru ve které je plyn. Ionizační komora je v podstatě deskový kondenzátor, který je izolovaně umístěn v kovové krabici s okénkem pro působící ionizátor. Kondenzátor je připojen na zdroj vysokého napětí. Napětí na deskách kondenzátoru můžeme měnit a jeho velikost měříme voltmetrem V. Do prostoru mezi deskami kondenzátoru necháme pronikat ionizující záření. Působením tohoto ionizačního činidla bude docházet k ionizaci plynu a současně i k rekombinaci iontů tak, že se mezi ionizací a rekombinací ustálí rovnováha. Pokud je spínač S v poloze 1 (nebude sepnut), napětí na elektrodách kondenzátoru je nulové a na elektrony a ionty v prostoru mezi elektrodami nepůsobí elektrická síla. Voltmetr i ampérmetr neukazují výchylku.



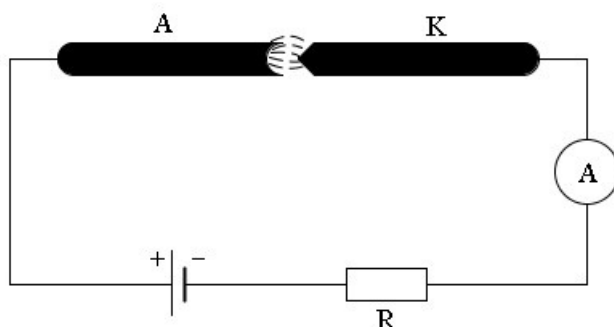
O 3.2.8.-4

Jestliže dáme spínač S do polohy 2 začnou na elektrony a ionty v prostoru mezi elektrodami působit síly elektrického pole. Elektrony a záporné ionty se pohybují k anodě A (+) a kladné ionty ke katodě K (-). Obvodem začne procházet proud, jehož velikost se bude měnit v závislosti na napětí mezi katodou a anodou. Průběh proudu v závislosti na napětí sledujte na O 3.2.8.-5 (tzv. voltampérová charakteristika). Zvyšujeme-li postupně napětí U na elektrodách kondenzátoru, roste proud I nejprve úměrně s napětím (úsek OA), tedy platí Ohmův zákon. Při dalším zvyšování napětí urychluje elektrické pole elektrony a ionty natolik, že nestačí rekombinovat. Proud již neroste přímo úměrně s napětím (úsek AB) až při určitém napětí U_n , kdy jsou všechny ionty vytvořené ionizátorem zachyceny na deskách kondenzátoru, dosáhne proud jisté mezní hodnoty I_n , zvané **nasycený proud** (úsek BC). V těchto popsanych fázích je vedení proudu v plynu **nesamostatné**. To znamená, že přítomnost ionizačního činidla je nezbytná. Pokud bychom odstranili vnější ionizátor, vedení proudu v plynu ustane.



O 3.2.8.-5

Při určité velikosti napětí na elektrodách začne proud velmi prudce narůstat. Nesamostatný výboj přešel v **samostatný výboj**. Při napětí U_z (**zápalné napětí**) získávají ionty a elektrony plynu tak velkou energii, že jsou samy schopny ionizovat další molekuly. Dochází k tzv. **ionizaci nárazem**. Ta vede k prudkému lavinovitému nárůstu volných nositelů náboje. Samostatný výboj v plynu pokračuje i po odstranění vnějšího ionizátoru. Bývá většinou doprovázen světelnými a zvukovými efekty. Vysoce ionizovaný plyn při samostatném výboji se nazývá **plazma**. V přírodě se nachází v nitru Slunce, hvězd nebo v ionosféře 100 km až 300 km nad zemským povrchem.



O 3.2.8.-6

T 3.2.8.-5

Za **normálního tlaku** mohou nastat tři druhy samostatného výboje.

- **Obloukový výboj** se dá demonstrovat následujícím pokusem, jehož schéma vidíte na O 3.2.8.-6. V obvodu se zdrojem (aspoň 60 V a poskytujícím proud aspoň 10 A) jsou zapojeny dvě uhlíkové elektrody a ochranný rezistor. Obloukový výboj vznikne, jestliže elektrody krátce přitiskneme k sobě a pak je oddálíme na několik milimetrů. Během dotyku se elektrody rozžhaví (asi 5000°C) a po oddálení způsobí tepelnou ionizaci okolního vzduchu.

Elektricky nabité částice, které se pohybují velmi rychle již vlivem vysoké teploty, jsou ještě dále urychlovány elektrickým polem mezi katodou a anodou. Další nositelé náboje vznikají termoemisí, podobně jako u elektronek. Rozžhavená katoda emituje elektrony, které s sebou odnášejí i částičky uhlíku. Proto se katoda během doby zahrocuje, kdežto anoda se vlivem dopadajících iontů a elektronů prohlubuje a tvoří se na ní kráter.

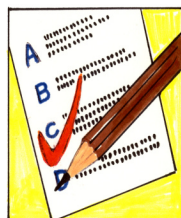
V technické praxi se elektrického oblouku používá v obloukových pecích nebo při obloukovém svařování.

Světlo, které vzniká při obloukovém výboji mezi rtuťovými elektrodami v křemenné trubici (rtuťová výbojka) je bohaté na ultrafialové záření a používá se v lékařství (horské slunce). Výbojky, které se plní sodíkem a vydávají žluté světlo se používají pro veřejné osvětlení.

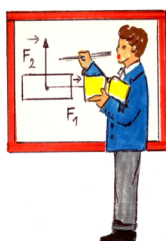
Ve zmíněných výbojkách nedochází k výboji za normálního tlaku, ale za nízkého tlaku.

- **Jiskrový výboj** se liší od obloukového výboje krátkou dobou trvání. Dochází k němu tehdy, když intenzita pole mezi elektrodami dosáhne hodnoty potřebné k lavinovité ionizaci, ale zdroj není schopen trvale dodávat elektrický proud. Jiskrový výboj je vlastně elektrický průraz plynu. Jiskra je provázena praskotem, který je způsoben tím, že Joulovo teplo vyvolané krátkodobým velmi velkým proudem vyvolá na výbojové dráze mimořádné ohřátí plynu a zvýšení tlaku. Takto vzniklý vysoký tlak se vyrovnává v plynu tlakovou vlnou, projevující se jako praskot. V přírodě je příkladem jiskrového výboje **blesk**, kterým se za bouřky vyrovnávají rozdílné elektrické potenciály mezi mraky nebo mrakem a zemí. Potenciálové rozdíly dosahují hodnoty až 10^9 V, proud dosahuje hodnoty až 10^5 A a během tisíciny sekundy se uvolňuje energie řádově 100 až 1000 kW.h.

- **Korona** vzniká v blízkosti vodičů tam, kde je velká intenzita elektrického pole. Velká intenzita elektrického pole může vést k tomu, že v okolním plynu nastane ionizace nárazem, a tím vzniká výboj. Korona se projevuje světélkováním a můžeme ji pozorovat např. na dálkovém elektrickém vedení vysokého napětí.



KO 3.2.8.-6. Víte jak probíhá zažehnutí pracovní látky ve spalovacím motoru ?



RU 3.2.8.-2. Jaká byla průměrná hodnota napětí mezi mrakem a zemí, jestliže při blesku s dobou trvání 1 ms procházel proud 80 kA ? Určete výkon elektrického proudu při blesku, jehož energie byla 10^9 J.

Řešení: $t = 1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$, $I = 80 \text{ kA} = 8 \cdot 10^4 \text{ A}$, $E = 10^9 \text{ J}$

Ze vztahu V 3.2.1.-2 plyne

$$Q = I \cdot t$$

Ze vztahu V 3.1.6.-2 plyne

$$W = E = Q \cdot U$$

Porovnáním obou rovnic dostaneme

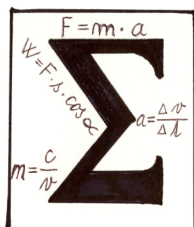
$$U = E / (I \cdot t)$$

dosadíme $U = 10^9 / (8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3}) = 12,5 \cdot 10^6 \text{ V} = 12,5 \text{ MV}$

Výkon definujeme jako práci (resp. energii) vykonanou za jednotku času, tedy

$$P = E / t$$

dosadíme: $P = 10^9 / 10^{-3} = 10^{12} \text{ W} = 1 \text{ TW}$



Elektricky vodivými se plyny stanou **ionizací**. Z molekuly se uvolňují elektrony a zbytek molekuly tvoří kladný iont. Pokud se elektron zachytí na neutrální molekule, vzniká záporný iont. V plynech se tedy účastní vedení proudu elektrony a ionty.

Aby se plyn stal vodivým, musíme nositele náboje

1. buď do něho vnést - uvolňování elektronů z kovu (termoemise, fotoemise, studená emise)

2. nebo je v něm vyvolat - vznik volných nositelů náboje vlivem ionizačních činidel (tepelná ionizace, ionizace zářením).

- K uvolnění elektronu z kovu musí elektron přijmout energii, která je rovna výstupní práci. Pokud dochází k emisi elektronů v důsledku zahřátí katody, hovoříme o **termoemisi**. K emisi elektronů může také docházet působením světla na katodu. V tomto případě hovoříme o **fotoemisi**. K emisi elektronů může také dojít působením silného elektrického pole. Hovoříme o **studené emisi**. Ve všech těchto případech přicházejí nositelé náboje (elektrony) do plynu z jedné elektrody.

- Pokud nositelé náboje (elektrony a ionty) vznikají z neutrálních molekul plynu působením ionizátoru, hovoříme o objemové ionizaci. Ionizační energie může být molekulám plynu dodána různým způsobem. U **tepelné ionizace** se tak děje zahříváním plynu, ale potřebnou ionizační energii může dodat také záření (**ionizace zářením**). Ionizátor tedy vyvolá ionizaci plynu a plynem bude procházet proud. Vedení proudu je však **nesamostatné**, tzn. pro vedení proudu je přítomnost ionizačního činidla nezbytná. Budeme-li sledovat závislost tohoto proudu na napětí mezi elektrodami zjistíme, že zpočátku roste proud úměrně s napětím a platí Ohmův zákon. Další zvyšování napětí mezi elektrodami již nevede k růstu proudu. Proud dosáhl hodnoty zvané **nasycený** proud. Dalším zvyšováním napětí získávají elektrony a ionty plynu tak velkou energii, že jsou schopny samy ionizovat další neutrální molekuly. Dochází k lavinovitému narůstání nosičů náboje, proud prudce roste a nesamostatné vedení proudu přechází v **samostatné** vedení.

Za normálního tlaku můžeme sledovat tři druhy samostatného výboje. Je to obloukový výboj, jiskrový výboj a koronu.

3.2.9. Vedení proudu v polovodičích



- porovnat kovy, polovodiče a izolanty (rezistivita, teplotní součinitel elektrického odporu a koncentrace volných nosičů náboje)
- vysvětlit elektrickou vodivost pomocí pásové teorie
- umět vysvětlit vlastní vodivost polovodičů
- znát nosiče proudu u vlastního polovodiče
- objasnit vznik páru elektron – díra
- vysvětlit princip dotování, vysvětlit jak vzniká elektronová a děrová vodivost
- znát majoritní a minoritní nosiče nábojů u polovodiče typu P a N



2 hodiny



Rezistivita materiálu. Závislost odporu na teplotě u kovu. Teplotní součinitel odporu.



T 3.2.9.-1

Pevné látky můžeme klasifikovat z hlediska elektrických vlastností pomocí tří základních parametrů.

1. Rezistivita ρ byla definována v T 3.2.3.-2. Její jednotkou v soustavě SI je $\Omega \cdot m$.

2. Teplotní součinitel elektrického odporu α definovaný vztahem V 3.2.3.-3 s jednotkou K^{-1} .

3. Koncentrace volných nosičů elektrického náboje n . Tato veličina představuje počet volných nosičů elektrického náboje v objemové jednotce a její jednotka v soustavě SI je m^{-3} .

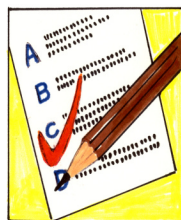
Měřením ρ , α a n (při pokojové teplotě) můžeme rozdělit krystalické pevné látky na

- **izolanty (nevodič, dielektrikum)**, které prakticky nevedou proud
- **kovy**
- **polovodiče**, které mají - rezistivitu značně větší než kovy,
 - teplotní součinitel je velký a záporný. To znamená, že odpor polovodiče s rostoucí teplotou klesá, zatímco u kovů roste,
 - značně nižší koncentraci volných nosičů elektrického náboje než kovy.

Prohlédněte si pozorně tabulku na O 3.2.9.-1. Jsou zde uvedeny zmíněné parametry u mědi (vodič), u křemíku (polovodič) a u křemene (izolant).

Měřený parametr	ρ	α	n
Jednotka	$\Omega \cdot m$	K^{-1}	m^{-3}
MĚĎ	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{28}$
KŘEMÍK	$2,5 \cdot 10^3$	$-70 \cdot 10^{-3}$	10^{16}
KŘEMEN	10^{16}	—	—

O 3.2.9.-1



KO 3.2.9.-1. Pro tři neznámé materiály jste získali následující údaje:

rezistivitu ρ

teplotní součinitel elektrického odporu α

koncentraci volných nosičů elektrického náboje n

vzorek C $\rho = 10^{-8} \Omega \cdot m$ $\alpha = +10^{-3} K^{-1}$ $n = 10^{29}$

vzorek T $\rho = 10^{-9} \Omega \cdot m$ $\alpha = -10^{-3} K^{-1}$ $n = 10^{28}$

vzorek S $\rho = 10^3 \Omega \cdot m$ $\alpha = -10^{-2} K^{-1}$ $n = 10^{15}$

Klasifikujte každý vzorek jako kov, izolant, polovodič, nebo jako žádný z těchto typů.

Vzorek C je.....

Vzorek T je.....

Vzorek S je
?



T 3.2.9.-2

Co způsobuje, že měď je vodič, křemík polovodič a diamant izolant?

Odpověď na tuto otázku není vůbec jednoduché. K jejímu objasnění musíme využít poznatků kvantové fyziky. V dalším výkladu naznačíme jen velmi stručně podstatu problému bez toho, že bychom se zabývali jeho matematickým řešením.

Budeme zkoumat pouze **krystalické pevné látky**, tedy pevné látky, jejichž atomy jsou uspořádány do struktury zvané krystalová mřížka. Krystalová mřížka představuje určité geometricky pravidelné uspořádání částic látky. Síly vzájemného působení mezi těmito částicemi nazýváme vazba mřížky.

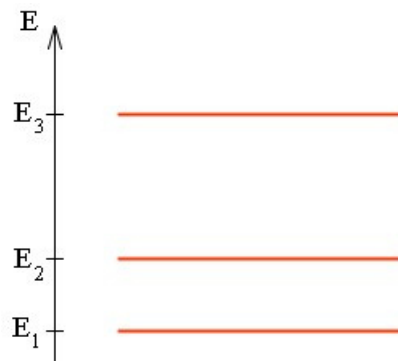
T 3.2.9.-3

Máme-li najít odpověď na otázku, položenou v předchozím textu T 3.2.9.-2, musíme začít u atomu. A právě atom byl jedním z prvních „úlovků“ kvantové mechaniky. Atom je tvořen jádrem (protony a neutrony) a obalem (elektrony). Všechny elektrony v atomu mají sice stejnou hmotnost a náboj, ale zdaleka si nejsou „rovny“. Pro popis zvláštností elektronové struktury atomového obalu používáme **čtyři kvantová čísla**. Těmito čísly je určen **stav** každého elektronu v atomu. Pro elektrony v atomu platí řada podmínek. Pro náš další výklad je třeba připomenout tyto:

- Žádné dva elektrony v atomu **nemohou** mít stejný soubor hodnot kvantových čísel, tj. nemohou být ve stejném stavu. Je to jeden ze základních principů stavby atomů a nazývá se **Pauliho vylučovací princip**.

- Vedle Pauliho principu je tu ještě další princip, jímž se příroda řídí při stavbě atomu. Je to **princip nejvýhodnějšího energetického řešení**. Tento princip vychází ze dvou kritérií: předpokládá co nejmenší energii atomů a požaduje maximální stabilitu atomů.

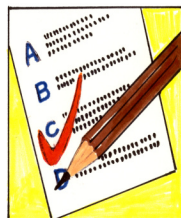
V celém dosavadním výkladu fyziky jsme předpokládali, že energie může nabývat jakýchkoliv hodnot. Tento předpoklad, který je nepochybně rozumný v běžném životě, však v oblasti mikrosvěta neplatí. **Energie elektronů v atomu je kvantována**. To znamená, že energie elektronů je omezena jen na určité hodnoty odpovídající jejich stavům. Hodnoty energie stavů elektronů nazýváme též **energetické hladiny**, jak je nakresleno na O 3.2.9.-2. Elektron může mít pouze energii odpovídající určité energetické hladině (tj. energii $E_1, E_2, \dots$), ale nemůže mít žádnou energii mezi hladinami. Při obsazování těchto energetických hladin jsou respektovány principy Pauliho a nejvýhodnějšího energetického řešení.



O 3.2.9.-2

První elektrony zaujímají stavy s nejnižší možnou energií (v O 3.2.9.-2 je to hladina s energií E_1) – říkáme že tuto hladinu **obsazují**. Pauliho vylučovací princip však limituje maximální možný počet elektronů na každé hladině a proto další elektrony musí zaujmout vyšší energetickou hladinu atd. Pokud je energetická hladina obsazena maximálním počtem elektronů v souladu s Pauliho principem, říkáme o ní, že je plná nebo **zcela zaplněná**. Naopak energetická hladina, která neobsahuje žádný elektron, je **prázdná** nebo též neobsazená. Mezi těmito krajními případy se nachází **částečně zaplněné hladiny**. Např. neutrální atom mědi má

29 elektronů, které se nacházejí na sedmi hladinách. Prvních šest hladin je zcela zaplněných (tj. obsahují maximální dovolený počet elektronů). Poslední sedmá hladina je částečně zaplněná. Obsahuje jeden elektron (maximální dovolený počet elektronů na této hladině je dva). Vyšší energetické hladiny jsou prázdné. Taková je situace v izolovaném atomu.



KO 3.2.9.-2. Předpokládejte, že na O 3.2.9.-2 je hladina E_1 plně obsazena a hladina E_2 je prázdná. Myslíte si, že elektron může přejít z hladiny E_1 na energeticky vyšší hladinu E_2 ?

?

KO 3.2.9.-3. Předpokládejte, že na O 3.2.9.-2 jsou hladiny E_1 a E_2 plně obsazeny. Myslíte si, že elektron může přejít z hladiny E_1 na energeticky vyšší hladinu E_2 ?

?



T 3.2.9.-4

Přidáváním dalších atomů složíme postupně mřížku krystalické látky. Vzájemné působení atomů při vytváření krystalické mřížky má za následek rozštěpení původních energetických hladin atomů na soustavu velmi blízkých hladin, tvořících **energetické pásy**. Dojde k rozšíření úzké energetické hladiny do tvaru pásu (O 3.2.9.-4).

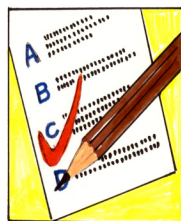


O 3.2.9.-4

Šířka pásu určuje interval dovolených energií. Sousední pásy dovolených energií jsou odděleny pásem zakázaných energií, které nemůže nabývat žádný elektron v pevné látce.

Pro výklad elektrické vodivosti a s ní souvisejících jevů v pevných látkách není třeba znát úplnou pásovou strukturu látky. Zcela postačující je z tohoto hlediska znalost energetických pásů elektronů, které jsou nejslaběji vázány k jádru atomu, protože jen ty se mohou podílet na elektrické vodivosti dané látky. Nejvyšší dovolené energetické pásy se nazývají **valenční pás** a **vodivostní pás**.

Tyto pásy mohou, ale nemusí být odděleny pásem zakázaných energií. A právě situace ve valenčním a vodivostním pásu a šířka pásu zakázaných energií mezi nimi rozhoduje o tom, jaká je vodivost dané látky.



KO 3.2.9.-4. Myslíte si, že energie elektronů v daném energetickém pásu je rovněž kvantována nebo může v rámci tohoto pásu nabývat libovolné hodnoty ?



T 3.2.9.-5

Jaká je situace u kovů ?

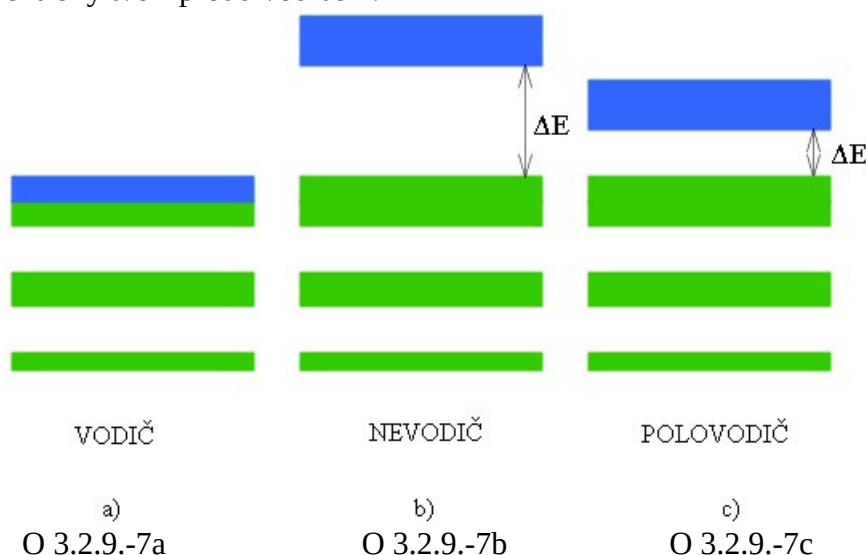
Kovy jsou krystalické pevné látky s tzv. kovovou vazbou. V textu T 3.2.9.-4 jsme hovořili o vzniku pásů dovolených a zakázaných energií v krystalu.

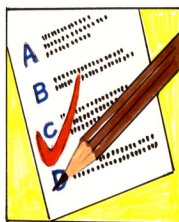
U kovů dojde také k oslabení vazby valenčních elektronů k určitému atomu v krystalu ve srovnání s izolovaným atomem. Vrátime-li se k našemu příkladu mědi - jedná se o elektron na částečně zaplněné sedmé hladině.

„Architektura“ krystalů s kovovou vazbou je tedy následující:

Mřížka je tvořena kladnými ionty (které vznikly z neutrálních atomů po ztrátě svých valenčních elektronů) a mezi nimi se zcela neuspořádaně pohybují **volné** elektrony. V případě mědi - každý atom Cu předá do „obecného majetku“ jeden volný elektron. Zdá se vám to málo? V 1cm^3 mědi je řádově 10^{22} těchto volných elektronů.

Na O 3.2.9.-7a vidíte schematické znázornění pásové struktury kovu. Zaplněné hladiny jsou zobrazeny zeleně, prázdné jsou modré. V kovu, jako je měď, se nejvyšší obsazená hladina energie nachází uvnitř energetického pásu, který je jen částečně zaplněn. Nad touto hladinou existuje velké množství volných hladin, které jsou pro volné elektrony snadno přístupné. Stačí, když připojíme vodič ke zdroji elektromotorického napětí. Elektrické pole zvyšuje kinetickou energii elektronů a tak je pozvedá na vyšší energetické hladiny. Tyto tzv. **vodivostní** elektrony tvoří proud vodičem.





KO 3.2.9.-5. Na O 3.2.9.-4 vidíte schéma pásové struktury vodiče (např. mědi). Ve kterém zeleném pásu leží energie volných elektronů? V pásu A, B nebo C ?
?



O 3.2.9.-4



T 3.2.9.-6

Vedou izolanty proud ?

Jestliže připojíme vodič ke zdroji elektrického napětí, bude vodičem procházet elektrický proud. Pokud uděláme totéž s izolantem, elektrický proud jím procházet nebude. Prohlédněte si O 3.2.9.-7b, na kterém vidíte schematické znázornění pásové struktury izolantu. Zaplněné hladiny jsou opět zobrazeny zeleně, prázdné jsou modré. **Valenční pás je zcela zaplněn a od prázdného vodivostního pásu je oddělen pásem zakázaných energií, ΔE .** Valenční pás je u izolantů plně obsazen elektrony a Pauliho vylučovací princip znemožňuje elektronům přesun v rámci valenčního pásu. Elektrony v plně obsazeném valenčním pásu nemají volné místo, kam by se mohly přesunout. Ale jednu možnost přece mají. Nad zaplněným valenčním pásem je mnoho prázdných hladin. Aby však elektron obsadil jednu z těchto hladin, musí získat dostatečnou energii na překonání širokého pásu zakázaných energií, který oba pásy odděluje. U diamantu je tento zakázaný pás $\Delta E = 5,5 \text{ eV}$. Tento zakázaný pás má sice značnou, ale přece jen konečnou energetickou šířku. Existuje tedy reálná šance, že pokud elektronu dodáme tuto energii, může se octnout ve vodivostním pásu. Od toho okamžiku začnou izolátory vést elektrický proud (probití izolátoru).

T 3.2.9.-7

Látky polovodičaté povahy. O jakou polovodičatost jde ?

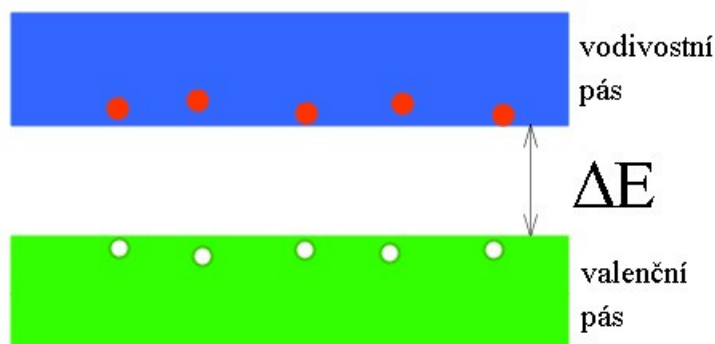
Ohromné množství látek v přírodě nepatří ani k dobrým vodičům elektrického proudu, ani k dokonalým izolantům – ale k polovodičům. Jejich polovodičaté vlastnosti jsou tak cenné, že způsobily pravou revoluci v technice. Které vlastnosti to jsou ?

- Na rozdíl od izolantů vedou proud již při pokojové teplotě.

- Na rozdíl od kovů jejich elektrický odpor s teplotou neroste, ale klesá. Příroda však izolanty, polovodiče a vodiče neoddelila až tak velkou propastí. Hloubka této propasti je nám vlastně už známa – je to velikost energie, kterou elektrony z nejvyššího obsazeného energetického pásu potřebují k přechodu do volných energetických stavů ve vodivostním pásu. Prohlédněte si O 3.2.9.-7a,b,c, na kterém vidíte schematické znázornění pásové struktury kovu, izolantu a polovodiče.
- U **kovů** se tento přechod děje v rámci jednoho pásu a potřebná energie je velmi malá.
- U **izolantu** je k překonání zakázaného pásu a k přechodu elektronu do vodivostního pásu třeba nemalé energie.
- U **polovodičů** jde již o hodnotu mnohem nižší, např. pro křemík je $\Delta E = 1,1 \text{ eV}$.

T 3.2.9.-8

Při nízké teplotě ($T \rightarrow 0\text{K}$) je valenční pás u polovodičů plně obsazen elektrony a Pauliho vylučovací princip znemožňuje elektronům přesun na jinou energetickou hladinu v rámci valenčního pásu. Elektrony jsou „zaklety“ v plně obsazeném valenčním pásu, tj. v krystalu nemají volné místo, kam by se mohly přesunout. S růstem teploty však roste jejich energie a potřebnou energii ΔE mohou elektrony u polovodičů získat již při pokojové teplotě. Protože do vodivostního pásu přecházejí elektrony již při těchto teplotách (ačkoliv jich přechází jen malá část), jsou polovodiče, i když nepříliš, přece jen vodivé. S růstem teploty polovodiče se počet těchto elektronů ve vodivostním pásu zvětšuje a je-li polovodič připojený ke zdroji, proud v něm roste a odpor tedy klesá.



O 3.2.9.-8

A co se přitom děje ve valenčním pásu ?

I tam se odehrávají zajímavé věci. Jsou podmíněny tím, že elektron, který přešel do vodivostního pásu, zanechá po sobě v původně plně obsazeném valenčním pásu volné místo, na které může přejít jiný elektron z nejbližšího okolí – ovšem ten za sebou zase zanechá volné místo (neobsazený energetický stav ve valenčním pásu), tzv. díru, a do té se snaží proniknout další elektron atd.

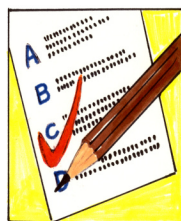
Přechody elektronů z valenčního do vodivostního pásu vedou ke vzniku stejného množství **neobsazených energetických stavů ve valenčním pásu**, které nazýváme **díry**. Obrázek

O 3.2.9.-8 ukazuje tento proces. Díra tedy nepředstavuje skutečnou reálnou částici (jakou je např. proton), ale neobsazený energetický stav ve valenčním pásu a tím je umožněna jistá volnost „pohybu“ elektronů ve valenčním pásu.

Elektrony (jejichž energie odpovídá energii vodivostního pásu) a díry (uvolněné energetické stavy ve valenčním pásu) slouží jako nosiče náboje.

Není-li polovodič zapojen ke zdroji napětí, je pohyb děr a elektronů neuspořádaný. Po připojení ke zdroji napětí vznikne v polovodiči elektrické pole, které způsobí, že vedle neuspořádaného pohybu se elektrony pohybují usměrněným pohybem proti intenzitě a díry ve směru intenzity elektrického pole. V polovodiči vznikl elektrický proud. Popsaný

mechanismus elektrické vodivosti se nazývá **vlastní vodivost**, látky s touto vodivostí se nazývají **vlastní polovodiče**.



KO 3.2.9.-6. Při běžné teplotě je hustota děr v čistém křemíku $6,8 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Kolik elektronů v m^3 tohoto polovodiče má energii odpovídající energii vodivostního pásu ?
?

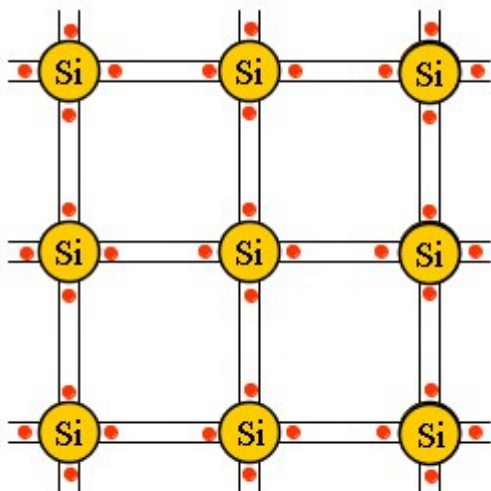


T 3.2.9.-9

Jaké poměry jsou v krystalické mřížce polovodiče ?

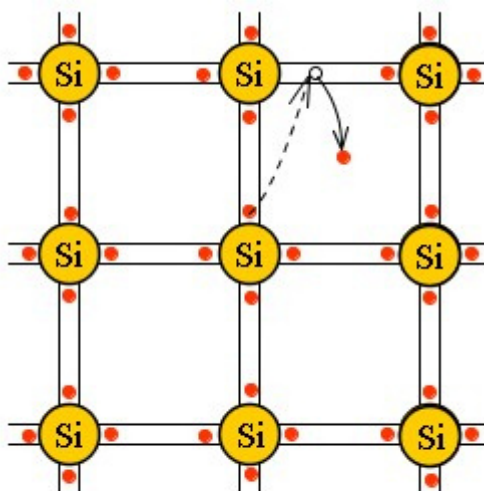
Jako příklad zkoumejme křemík, který patří k typickým představitelům polovodičů. Atom křemíku má 14 elektronů.

Energeticky nejnižší hladiny jsou plně obsazeny deseti elektrony. Těchto deset elektronů je pevně vázáno k jádru. Pro naše další úvahy jsou důležité čtyři zbývající elektrony. Při spojení atomů v krystal se právě tyto elektrony podílejí na vytvoření vzájemných vazeb mezi atomy. Tyto elektrony vytvářejí elektronové vazebné dvojice se čtyřmi sousedními atomy v krystalové mřížce. Tento druh vazby mezi atomy označujeme jako **kovalentní vazbu**. V kovalentní vazbě dva atomy **sdílejí** dvojici elektronů. Na O 3.2.9.-9a vidíte model rovinné krystalické mřížky čistého křemíku. Každý křemíkový atom je vázán ke svým čtyřem sousedům dvouelektronovými kovalentními vazbami. Elektrony (znázorněné červenými tečkami) přísluší vazbě, nikoliv jednotlivým atomům. Energie těchto elektronů jsou ve valenčním pásu křemíku. Vzorek čistého křemíku, který vidíte na obrázku, nevede proud. Jestliže se elektron odtrhne z nějaké vazby (O 3.2.9.-9b), stane se volným a může se pohybovat uvnitř mřížky. Jeho místo (díru) může zaujmout některý ze sousedních elektronů. Tato situace nastane, pokud některý z valenčních „červených“ elektronů získá energii , která je rovna šířce zakázaného pásu ΔE , tj. přejde z valenčního pásu do vodivostního. Tento přechod ale znamená, že se ve valenčním pásu uvolnil energetický stav (vznikla díra), který může obsadit jiný „červený“ elektron.



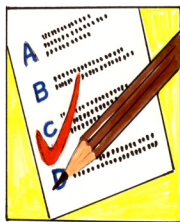
a)

O 3.2.9.-9a



b)

O 3.2.9.-9b



KO 3.2.9.-7. Víte co znamenají symboly (Si) v O 3.2.9.-9a ? Jsou to

- a) atomy křemíku
- b) kladné ionty křemíku
- c) záporné ionty křemíku

?

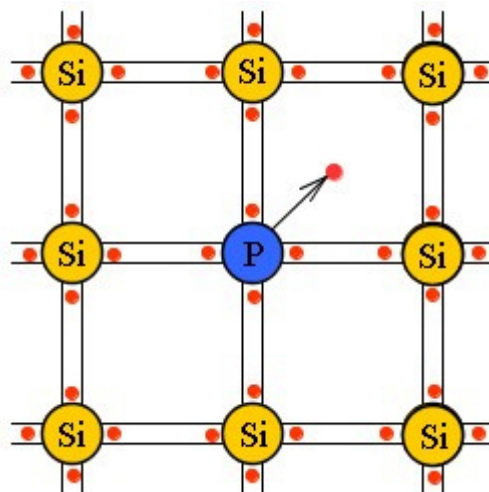


T 3.2.9.-10

Co je pro někoho zhoubné, může být pro jiného užitečné.

Jestliže např. požadujete kovový vodič o vysoké elektrické vodivosti, pak jsou jakékoliv příměsi naprosto nežádoucí, ba přímo zhoubné. Atomy příměsi, které pronikly do krystalové mřížky kovu způsobí, že elektrická vodivost kovu se silně snižuje a odpor ovšem roste. Avšak tytéž defekty

mřížky jsou zároveň klíčem úspěchů **příměsových (dotovaných) polovodičů**. Proces zavedení malého množství vhodných příměsových atomů do polovodičové mřížky nazýváme dotování. Obvykle je nahrazen příměsovým atomem pouze jeden atom z 10^7 křemíkových atomů. Zabudované atomy příměsi, pokud je jich velmi málo, nemění celou krystalickou mřížku, ale jen její jednotlivé části v bezprostředním okolí atomu příměsi. Obraz pásové struktury, společný pro celý krystal, se tím však modifikuje. V zakázaném pásu, který odděluje valenční a vodivostní pás, se vlivem příměsi objeví dodatečné energetické hladiny dovolené pro elektrony.



O 3.2.9.-10

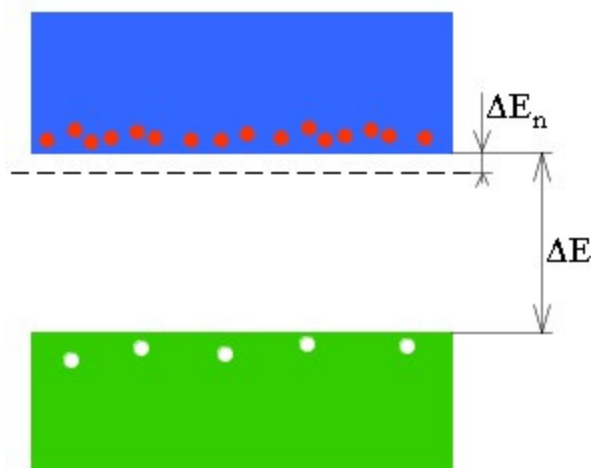
T 3.2.9.-11

Polovodiče typu N.

Řekněme, že se ke křemíku přimísí několik atomů fosforu. Atomy fosforu tedy někde musejí vytěsnit atomy křemíku a zaujmout jejich místo v krystalické mřížce. Na obrázku O 3.2.9.-10 je centrální křemík nahrazen atomem fosforu.

Přitom každý atom fosforu musí převzít povinnosti vytěsněného atomu křemíku. Atom fosforu však má pět valenčních elektronů. Čtyři „obětuje“ na vytvoření kovalentní vazby – jde celkem o čtyři vazby, které musel poskytnout vytěsněný křemík. A co se stane s pátým elektronem ? Tento pátý „nadbytečný“ elektron již není tak pevně vázán a bude tedy poměrně svobodný. Výpočty ukazují, že energie tohoto elektronu odpovídá stavu, který leží v pásu zakázaných energií ve vzdálenosti ΔE_n pod dnem vodivostního pásu. Situaci vidíte na O 3.2.9.-11. Aby se elektron dostal do vodivostního pásu, musí dostat ještě energii ΔE_n , ale ta je mnohem menší než je šířka samotného pásu zakázaných energií ΔE pro křemík.

Při pokojové teplotě jsou prakticky všechny elektrony dodané fosforem ve vodivostním pásu a pokud je polovodič připojen ke zdroji elektrického napětí účastní se tyto elektrony vedení proudu. Atomy fosforu dávají velmi štědrě elektrony krystalu křemíku, nazývají se proto **donory** (dárce). Nesmíte ale zapomenout, že i v dotovaném polovodiči je realizován mechanismus, který jsme nazvali vlastní vodivost, tj. přechod uvolněných elektronů křemíku z valenčního do vodivostního pásu a vznik děr ve valenčním pásu.

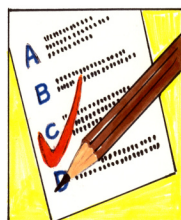


O 3.2.9.-11

Energetické hladiny elektronů křemíku leží ve vzdálenosti ΔE pod dnem vodivostního pásu, energetické hladiny donorů leží ve vzdálenosti ΔE_n pod dnem vodivostního pásu. Protože elektrony z této hladiny mohou snadno přejít do vodivostního pásu, obsahuje vodivostní pás mnohem více elektronů než je děr ve valenčním pásu.

U takto dotovaného polovodiče jsou většinovými nosiči nábojů elektrony. Hovoříme o **polovodiči typu N (negativní)**. Díry jsou menšinovými nosiči nábojů.

Polovodiče dotované atomy donorů se nazývají polovodiče **typu N**. V polovodiči typu N jsou **elektrony majoritními** (tj. většinovými) nosiči, kdežto **díry** jsou **minoritními** (tj. menšinovými) nosiči náboje.



KO3.2.9.-8. Vzorek čistého křemíku obsahuje při pokojové teplotě 10^{16} vodivostních elektronů. Předpokládejte, že tento vzorek dotujete 10^{22} atomy fosforu.

a) Kolik děr je ve vzorku ?

b) Kolik elektronů je ve vodivostním pásu ?

?

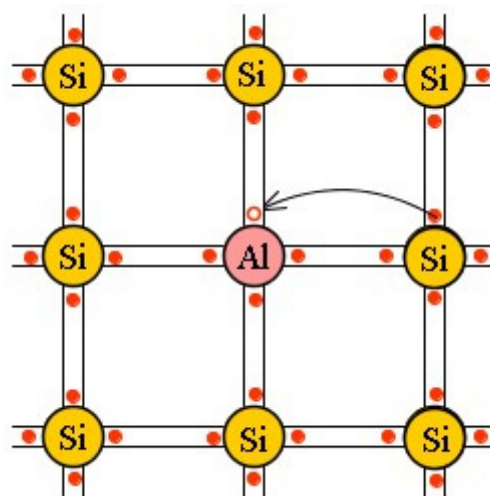


T 3.2.9.-12

Polovodiče typu P.

Vezměme nyní místo fosforu atom se třemi valenčními elektrony, např. hliník (O 3.2.9.-12). Zaujme-li hliník v krystalické mřížce místo

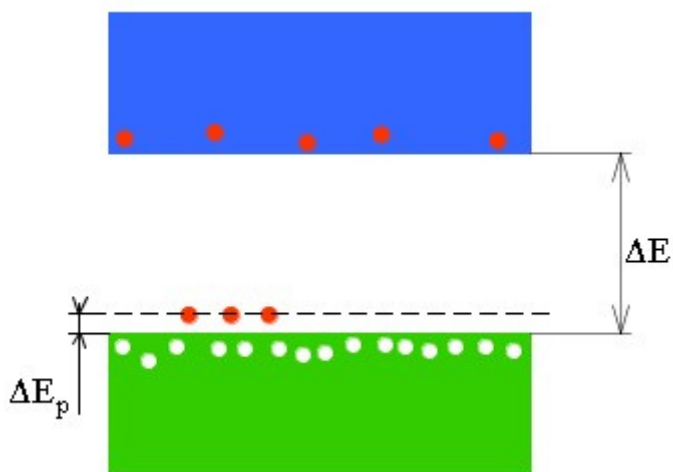
křemíku, může se vázat pomocí kovalentních vazeb pouze ke třem atomům křemíku, takže v jedné vazbě mezi křemíkem a hliníkem je jeden „chybějící“ elektron, tedy díra. Jestli jsme nazvali atomy fosforu s pěti valenčními elektrony jako „štědré atomy“, pak atomy křemíku se třemi valenčními elektrony bychom



O 3.2.9.-12

museli nazvat jako „chamtivé atomy“. Dodáním jen malého množství energie (připojení polovodiče ke zdroji elektrického napětí) atom hliníku se zmocní elektronu, který patří sousednímu atomu křemíku.

Tím ovšem není věc vyřízena, neboť atom křemíku řeší svůj problém (chybějící elektron) zase u jiného atomu křemíku atd. Tímto způsobem se díra přemísťuje mřížkou. Na O 3.2.9.-13 je ukázán odpovídající pásový model polovodiče typu P. V blízkosti valenčního pásu je v zakázaném pásu křemíku energetická hladina odpovídající hliníku, která není obsazena elektrony. Energetická vzdálenost této hladiny od vrcholu valenčního pásu je ΔE_p . Vzhledem k malé energetické vzdálenosti od valenčního pásu mohou na tuto hladinu přejít elektrony z valenčního pásu. Ve valenčním pásu tak vzniká mnohem více děr. Je třeba si opět uvědomit, že i tento příměsový polovodič má určité vlastnosti vlastního polovodiče, tj. přechod uvolněných elektronů křemíku do vodivostního pásu a vznik děr ve valenčním pásu. Následkem dotování se ve valenčním pásu nachází mnohem více děr, vodivostní pás obsahuje stejný počet elektronů jako měl před dotováním.



O 3.2.9.-13

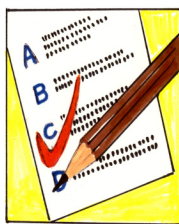
Příměsi, které mají stejnou funkci v krystalu polovodiče jako hliník, se nazývají **akceptory (příjemce)**. U polovodiče dotovaného právě popsaným způsobem jsou většinovými nosiči nábojů díry. Hovoříme o **polovodiči typu P (pozitivní)**. Elektrony jsou menšinovými nosiči nábojů.

Polovodiče dotované atomy akceptorů se nazývají polovodiče **typu P**. V polovodiči typu P jsou **díry majoritními** (tj. většinovými) nosiči, kdežto **elektrony** jsou **minoritními** (tj. menšinovými) nosiči náboje.



T 3.2.9.-13

Pokusme se nyní přimísit do křemíku atomy fosforu i hliníku. O jaký typ elektrické vodivosti potom půjde? Je jasné, že to bude záviset na poměru počtu atomů obou příměsí.



KO 3.2.9.-9. Křemík bude dotován fosforem i hliníkem tak, že atomů fosforu bude více než atomů hliníku. Potom půjde převážně o vodivost

- a) elektronovou
- b) děrovou.

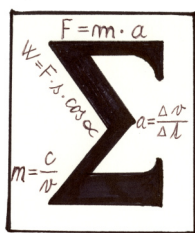
?

K čemu je to však dobré?

Ukazuje se, že různé poměry obou typů příměsí dávají možnost významných aplikací polovodičů. Důležitou roli při tom hraje nestejná pohyblivost elektronů a děr. Pod pojmem pohyblivost rozumíme rychlost, jakou elektrony resp. díry nabývají v elektrickém poli jednotkové intenzity. Pohyblivost ovšem úzce souvisí s vodivostí krystalu. Výsledkem souhry různých pohyblivostí elektronů a děr v různých směrech může být nakonec to, že krystal snadno propouští elektrický proud v jednom směru a ve druhém ho prakticky nepropouští vůbec. Polovodičové krystaly těchto vlastností se nazývají **diody** a mohou sloužit jako usměrňovač. Jsou složeny ze dvojice krystalů o různých typech vodivosti, tj. s vodivostí elektronovou a děrovou. Poblíž místa jejich dotyku se každý z krystalů obohacuje donorovou resp. akceptorovou příměsí. Takový kontakt se pak nazývá **P-N přechod**.

P-N přechod může také emitovat světlo a může tedy sloužit jako **LED dioda** (z angl. light-emitting diode, tedy **dioda emitující světlo**). **Fotodioda** pracuje na opačném principu. Osvětlení vhodného P-N přechodu může mít za následek vznik elektrického proudu v obvodu.

Tranzistor je polovodičová součástka složitější konstrukce. Používá se k zesilování vstupních signálů. Počítače a jiná elektronická zařízení používají obrovský počet tranzistorů, kondenzátorů, rezistorů apod. Ty se v nich nezapojují jako jednotlivé prvky, ale jsou vytvořeny (integrovány) na jediném polovodičovém **čipu**, kde vytvářejí integrovaný obvod.



Tři elektrické vlastnosti, které můžeme použít pro rozlišení krystalických pevných látek, jsou rezistivita, teplotní součinitel rezistivity a koncentrace volných nosičů náboje. Pevné látky můžeme rozdělit na **vodiče, polovodiče a izolanty**.

Energie izolovaného atomu je **kvantována**. Když se atomy přibližují, aby vytvořily pevnou látku, jejich energetické hladiny se mění v **energetické pásy** pevné látky. Tyto energetické pásy jsou vzájemně odděleny pásy

zakázaných energií.

V izolantech je nejvyšší pás obsahující elektrony zcela zaplněn a je oddělen od neobsazeného pásu tak velkým zakázaným pásem, že elektrony jej mohou překonat jen velmi obtížně.

U kovů se nejvyšší obsazená hladina energie nachází uvnitř energetického pásu, který je jen částečně zaplněn. Nad touto hladinou existuje velké množství volných hladin na které mohou volné elektrony přejít i když dostanou jen malé množství energie.

Pásová struktura **polovodičů** je podobná struktuře izolantů s tím rozdílem, že šířka zakázaného pásu mezi valenčním a vodivostním pásem polovodiče je mnohem menší. Proto již při pokojové teplotě může malá část elektronů přejít do vodivostního pásu (vlivem tepelné aktivace), a tím vznikne ve valenčním pásu stejný počet volných energetických stavů – děr. U **vlastních polovodičů** jsou elektrony a díry nosiče náboje. Vodivost polovodiče lze výrazně ovlivnit pomocí **příměsí**. Podle toho jaké příměsi použijeme, hovoříme o polovodiči **typu N**, kde majoritními nosiči náboje jsou elektrony a **typu P** u kterého jsou majoritními nosiči díry.

3.3. Magnetické pole a jeho vlastnosti



T 3.3.0.-1

První magnetické jevy byly pozorovány u přirozených magnetů (magnetovec).

Již staří Řekové a Číňané znali schopnost těchto minerálů přitahovat některé kovy.

Až do roku 1819 byl magnetismus považován za samostatný jev. Pokusy dánského fyzika Oersteda ukázaly, že magnetické účinky jsou vyvolány také pohybujícími se elektrickými náboji. Říkáme, že

v okolí pohybujících se nábojů nebo v okolí magnetů vzniká magnetické pole. Toto pole působí silovými účinky na jiné pohybující se náboje nebo magnety.

Původ kteréhokoli magnetického pole kolem nás můžeme vysvětlit jedním ze dvou mechanismů :

- Pohybující se elektricky nabitě částice (a tedy i vodiče, kterými prochází elektrický proud) vytvářejí ve svém okolí magnetické pole.
- Magnetické pole látky má původ v magnetických vlastnostech atomů. K magnetickému poli atomů přispívají elementární částice, ze kterých se atom skládá (hlavně elektrony). V určitých látkách se skládají magnetická pole atomů a vytvářejí navenek výrazné magnetické pole. Tak je tomu u látek, z nichž jsou vyrobeny permanentní magnety. V ostatních látkách se magnetická pole všech atomů vyruší a žádné výraznější magnetické pole jako výsledek nevznikne.

T 3.3.0.-2

- V této kapitole se nebudeme zabývat způsobem vzniku magnetického pole, budeme předpokládat jeho existenci.
- Nové informace, týkající se magnetického pole, budeme porovnávat s poznatky, které již známe ze studia elektrického pole.
- Pokud budeme hovořit o částici, která má náboj Q a hmotnost m , použijeme zkrácený zápis : částice (Q,m) .
- Protože v následujícím textu může na částici (Q,m) působit pole elektrické i magnetické, budeme rozlišovat F_e a F_m , tj.sílu elektrického a magnetického pole.

3.3.1. Definice magnetické indukce



- popsat silové působení magnetického pole na pohybující se částici s nábojem Q
- vědět, že magnetická indukce charakterizuje silové působení magnetického pole na pohybující se částici (Q,m)
- určit směr magnetické síly
- znát jednotku magnetické indukce tesla (T)



2 hodiny



Vznik a vlastnosti elektrického pole. Definice intenzity E . Pohyb nabitých částic v elektrickém poli. Newtonův zákon síly.



T 3.3.1.-1

Elektrické pole

Částice (Q_1, m) vytváří v každém bodě prostoru kolem sebe elektrické pole. Elektrické pole považujeme za jednu z forem hmoty. Elektrické pole působí silou na každou částici s nábojem Q_2 , která se v tomto poli nachází.

Elektrické pole jsme charakterizovali vektorem intenzity elektrického pole E . Pole ve kterém platí $E = \text{konst.}$ jsme nazývali homogenní elektrické pole.

Pokud se nachází v elektrickém poli intenzity E částice (Q, m) , elektrické pole působí na částici silou velikosti

Magnetické pole

Pohybující se elektricky nabitá částice nebo magnet vytváří v každém bodě prostoru kolem sebe **magnetické pole**. Magnetické pole považujeme za jednu z forem hmoty, jejímž charakteristickým projevem jsou síly působící na elektrické náboje, které se v tomto poli pohybují.

Magnetické pole budeme charakterizovat vektorem **magnetické indukce B** .

Pole, ve kterém platí $B = \text{konst.}$ budeme nazývat **homogenní magnetické pole**.

Magnetické pole, jehož indukce se s časem nemění, je **stacionární magnetické pole**. Vytváří ho

- nepohybující se vodič s konstantním proudem
- proud nabitých částic, pohybující se rovnoměrně přímočaře
- nepohybující se magnet

Magnetické pole, jehož indukce se s časem mění nazýváme pole **nestacionární**.

Pokud se pohybuje v magnetickém poli indukce B částice (Q, m) , magnetické pole působí na částici silou velikosti

$F_e = E.Q$ Symbolem F_e jsme označili sílu, kterou působí elektrické pole na nabitou částici (Q,m). Z uvedené rovnice plyne, že tato síla působí na částici (Q,m) vždy.	$F_m = Q.v.B \sin \alpha$ Symbolem F_m jsme označili velikost síly, kterou působí magnetické pole na částici (Q,m). Uvidíme, že tato síla nepůsobí na nabitou částici vždy.
--	---

T 3.3.1.-2

V následujícím výkladu budeme uvažovat **homogenní** magnetické pole.

Síla je vektor a tedy síla F_m , kterou působí magnetické pole na částici (Q,m), je definována **velikostí** a **směrem**.

Jaká je tedy velikost síly F_m ?

Velikost síly, kterou magnetické pole působí na částici (Q,m), je

$$F_m = Q.v.B \sin \alpha$$

V 3.3.1.-1

Význam symbolů v rovnici je následující :

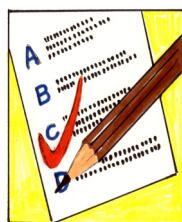
Q náboj částice

B velikost magnetická indukce pole, ve kterém se částice nachází

v rychlost, se kterou se částice v magnetickém poli pohybuje

α úhel, který svírá vektor rychlosti částice s vektorem magnetické indukce.

Z této rovnice plynou velmi důležité závěry. Pokuste se sami o jejich formulaci.



KO 3.3.1.-1. Jak velkou silou působí magnetické pole na částici, jejíž náboj je nulový ?
?

KO 3.3.1.-2. Jak velkou silou působí magnetické pole na nabitou částici, která je v magnetickém poli v klidu ?
?

KO 3.3.1.-3. Jak velkou silou působí magnetické pole na nabitou částici, která vstoupí do pole tak, že vektor její rychlosti je rovnoběžný s vektorem magnetické indukce ?
?

KO 3.3.1.-4. Částice s nábojem Q se pohybuje v magnetickém poli indukce B rychlostí v . Jak se musí částice v poli pohybovat, aby velikost síly F byla maximální ?
?

Závěr :

Magnetické pole působí na částici silou $F = 0$ N pokud

- částice má nulový náboj
- nabitá částice je v magnetickém poli v klidu
- nabitá částice má v magnetickém poli takovou rychlost v , že vektory v a B jsou rovnoběžné.
- Magnetické pole působí na částici maximální silou (pro dané Q,v,B) pokud

nabitá částice má v magnetickém poli takovou rychlost $\mathbf{v}$, že vektory $\mathbf{v}$ a $\mathbf{B}$ jsou kolmé. Velikost maximální síly přečteme ze vztahu V 3.3.1.-1

$$F_m(\max) = Q \cdot v \cdot B. \quad \text{V 3.3.1.-2}$$

A právě pomocí velikosti této **maximální síly** definujeme velikost magnetické indukce B .

Elektrické pole Intenzita elektrického pole je definována ze vztahu V 3.1.3.-1 $E = \frac{F_e}{Q}$ Jednotkou elektrické intenzity je $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$.	Magnetické pole Indukce magnetického pole je definována ze vztahu V 3.3.1.-2 $B = \frac{F_m(\max)}{Q \cdot v}$ Jednotkou magnetické indukce je tesla (T).
--	---

Přibližné velikosti magnetických indukcí některých polí si prohlédněte v tabulce:

Přibližné velikosti magnetických indukcí některých polí	
Blízko velkého elektromagnetu	1,5 T
Blízko malého tyčového magnetu	10^{-2} T
Na povrchu Země	10^{-4} T

KO 3.3.1.-5. Částice (Q, m) vstupuje s rychlostí $\mathbf{v}$ postupně do tří různých magnetických polí, jejichž indukce mají velikost B_1, B_2, B_3 , ale vždy tak, že vektor rychlosti $\mathbf{v}$ je kolmý na vektor $\mathbf{B}$. Magnetická pole působí na částici silami

$F_1 = 1 \cdot 10^{-22}$ N, $F_2 = 8 \cdot 10^{-22}$ N, $F_3 = 6 \cdot 10^{-22}$ N. U kterého pole je největší magnetická indukce ?

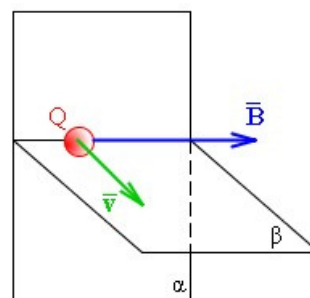
?



T 3.3.1.-3

Jaký je směr síly F_m ?

Prohlédněte si obrázek O 3.3.1.-1a.



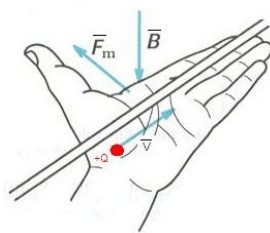
O 3.3.3.-1a.

Vektory $\mathbf{v}$ a $\mathbf{B}$ leží v rovině β . Síla F_m , kterou magnetické pole působí na částici, leží v rovině α kolmé k rovině β . Síla F_m je tedy kolmá na oba

vektory $\mathbf{v}$ a $\mathbf{B}$.

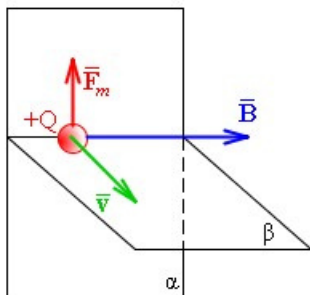
Pro stanovení orientace síly F_m , působící na částici s kladným nábojem, můžeme použít pravidlo levé ruky (O 3.3.1.-2). Otevřenou levou ruku položte tak, aby

- prsty ukazovaly směr pohybu náboje
- indukce $\mathbf{B}$ vstupovala do dlaně
- vztyčený palec ukazuje směr síly F_m , kterou magnetické pole působí na **kladný náboj**.

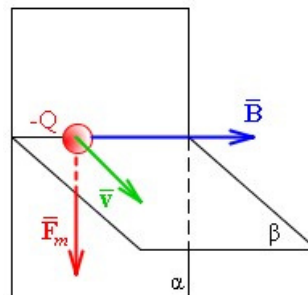


O 3.3.1.-2

Situaci vidíte na O 3.3.1.-1b .



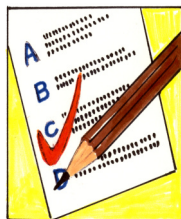
O 3.3.1.-1b



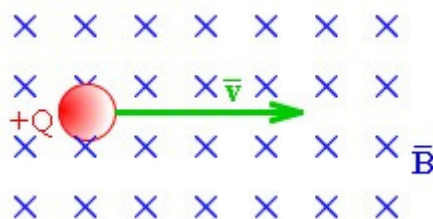
O 3.3.1.-1c

Pokud se v poli pohybuje záporný náboj (obr. 3.3.1.-1c) , síla F_m má opačnou orientaci.

Síla F_m , kterou magnetické pole působí na nabitou částici pohybující se rychlostí v v magnetickém poli indukce B , má velikost $F_m = Q \cdot v \cdot B \sin \alpha$ a je vždy kolmá na oba vektory v a B .



KO 3.3.1.-6. Na O 3.3.1.-4 má vektor magnetické indukce B směr kolmý na rovinu nákresny a míří do obrázku (označeno symbolem $\times$). Pokud se v tomto poli pohybuje kladná částice $+Q$ rychlostí v , působí na ní magnetické pole silou F_m . Nakreslete její směr.

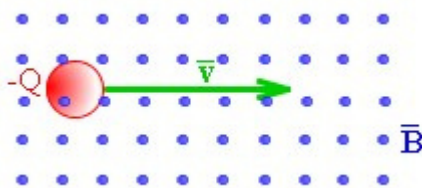


?

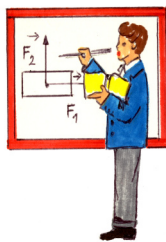
O 3.3.1.-4

KO 3.3.1.-7. Na O 3.3.1.-6 má vektor magnetické indukce B směr kolmý na rovinu nákresny a míří z obrázku (označeno symbolem $\bullet$). Pokud se v tomto poli pohybuje záporná částice $-Q$ rychlostí v , působí na ní magnetické pole silou F_m . Nakreslete její směr.

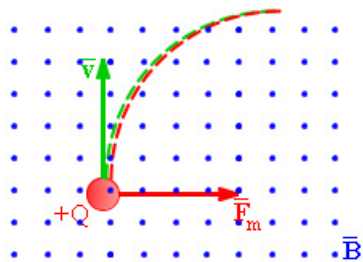
?



O 3.3.1.-6



RU 3.3.1.-1. Magnetická indukce homogenního magnetického pole má velikost $1,2 \text{ mT}$ a vektor B je kolmý k nákresně a míří na vás (O 3.3.1.-8). Proton je urychlen elektrickým polem napětím $U = 5,3 \cdot 10^4 \text{ V}$ a vstoupí do magnetického pole podle obrázku tak, že



vektor v je kolmý na vektor B . Jakou silou působí magnetické pole na proton? S jakým zrychlením se proton pohybuje?

O 3.3.1.-8

Řešení:

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \quad Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad U = 5,3 \cdot 10^4 \text{ V}, \quad B = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

Nejprve vyřešíme rychlost, se kterou proton do magnetického pole vstupuje. Proton projde potenciálním rozdílem U a získá kinetickou energii. Tuto úlohu jsme vyřešili v RU 3.1.6.-4

Z rovnice $Q \cdot U = m \cdot v^2 / 2$ jsme vypočítali rychlost

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot U}{m}}$$

Sílu magnetického pole vypočítáme z rovnice V 3.3.1.-2

$$F_m = Q \cdot B \cdot (2 \cdot Q \cdot U / m)^{0,5}$$

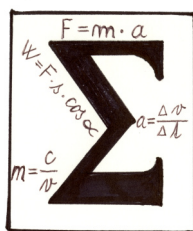
$$\text{Dosadíme : } F_m = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} (2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,3 \cdot 10^4 / 1,67 \cdot 10^{-27})^{0,5}$$

$$F_m = 6,1 \cdot 10^{-16} \text{ N}$$

Zrychlení vypočítáme z rovnice $F_m = m \cdot a$ tedy $a = F_m / m$

$$\text{Dosadíme : } a = 6,1 \cdot 10^{-16} / 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ tedy } a = 3,7 \cdot 10^{11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Na proton působí magnetické pole silou velikosti $6,1 \cdot 10^{-16} \text{ N}$. Směr síly určíme pravidlem levé ruky. Zrychlení protonu je $3,7 \cdot 10^{11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Později si ukážeme že je to zrychlení dostředivé a proton se bude pohybovat po kružnici v rovině obrázku.



Magnetické pole charakterizujeme vektorem **magnetické indukce B** . Magnetická indukce B je definována pomocí síly F_m působící na zkušební částici s nábojem $+Q$, která se pohybuje rychlostí v v magnetickém poli.

- **Velikost** této síly je dána vztahem

$$F_m = Q \cdot v \cdot B \sin \alpha$$

V 3.3.1.-1

Pokud částice (Q, m) má v magnetickém poli rychlost pro kterou platí

$v \perp B$, magnetické pole působí na částici maximální silou, jejíž velikost je dána vztahem

$$F_m(\text{max}) = Q \cdot v \cdot B$$

V 3.3.1.-2

Velikost maximální síly $F_m(\text{max})$ nám může sloužit k definici velikosti magnetické indukce

$$B = \frac{F_m(\text{max})}{Q \cdot v}$$

Jednotkou magnetické indukce je **tesla (T)**.

- **Směr** síly F_m určíme pomocí pravidla levé ruky. Síla F_m je kolmá na vektory v a B .

3.3.2. Indukční tok



- vědět, že pomocí magnetických indukčních čar znázorňujeme magnetické pole
- znát průběh magnetických indukčních čar v okolí magnetů
- popsat silové působení dvou magnetů
- umět charakterizovat magnetické pole Země
- znát definici indukčního toku
- znát jednotku indukčního toku



1 hodina



Elektrické siločáry a jejich vlastnosti.



T 3.3.2.-1

Jak si můžeme „zviditelnit“ magnetické pole?

K názornému zobrazení elektrického pole nám posloužily elektrické siločáry. Definovali jsme je takto:

Jsou to myšlené orientované křivky jejichž

- tečny v každém bodě definují směr intenzity E elektrického pole
- hustota nás informuje o velikosti intenzity E elektrického pole.

Známe dva druhy elektrického náboje: kladný a záporný. O elektrických siločarách jsme říkali (v kapitole 3.1.), že vycházejí z kladného náboje a končí na záporném náboji (resp. v nekonečnu) jak vidíte na

Magnetické pole znázorňujeme pomocí **magnetických indukčních čar**. Jsou to myšlené orientované křivky, které nás informují o směru a velikosti magnetické indukce B .

- Směr tečny k magnetické indukční čáře v každém bodě určuje vektor (tedy směr) indukce B .
- Hustota indukčních čar nás informuje o velikosti magnetické indukce B v dané oblasti.

Na O 3.3.2.-1 vidíte magnetické indukční čáry tyčového magnetu (tj. permanentního magnetu ve tvaru tyče). Experimentálně lze obrázek ověřit pomocí železných pilin, které se nastavují podél indukčních čar tak, jak

obrázcích O 3.1.3.-7b, O 3.1.3.-8a, O 3.1.3.-8b.

vidíte na obrázku. Indukční čáry tvoří **uzavřené** křivky (žádný magnetický monopol nebyl dosud nalezen). Indukční čáry vycházejí z jednoho konce magnetu a vcházejí do druhého (a pokračují dál uvnitř magnetu).

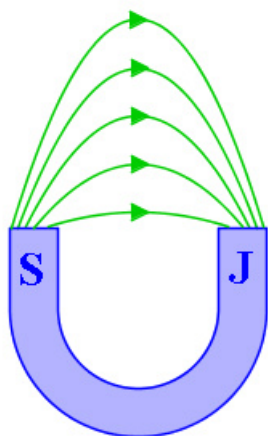
Konec, ze kterého indukční čáry vycházejí, se nazývá **severní pól magnetu**.

Opačný konec (kam siločáry vstupují do magnetu) se nazývá **jižní pól magnetu**.

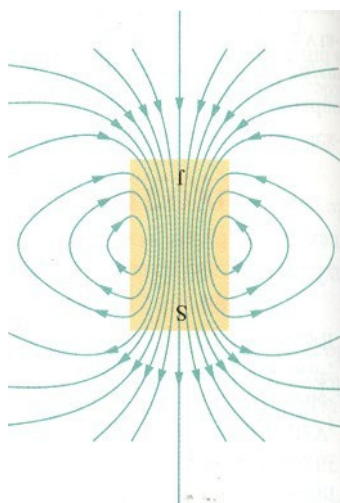
Na O 3.3.2.-2 vidíte indukční čáry u podkovovitého magnetu v prostoru mezi póly. Indukční čáry uvnitř magnetu nejsou zakresleny. Stejně je tomu na O 3.3.2.-3 kde vidíte magnet, jehož čela bývají někdy upravena pólovými nástavci. Pólové nástavce bývají blízko sebe a jsou navzájem rovnoběžné. Magnetické pole mezi nimi je silné a přibližně homogenní (indukční čáry jsou rovnoběžné).

Když k sobě magnety přiblížíme, zjistíme, že

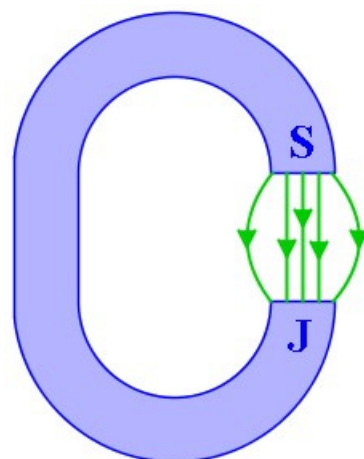
opačné póly magnetu se přitahují, souhlasné odpuzují.



O 3.3.2.-2



O 3.3.2.-1



O 3.3.2.-3

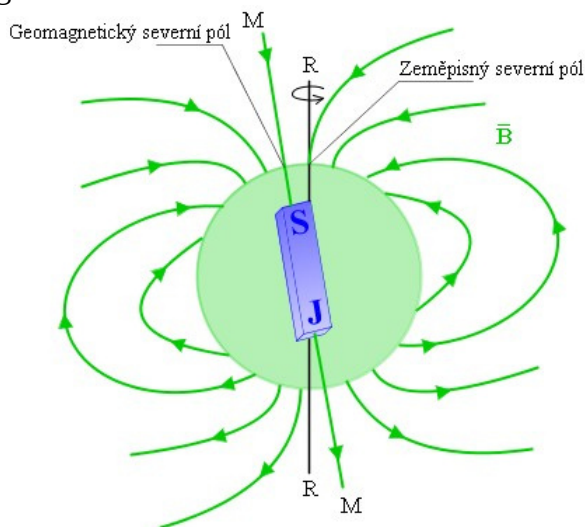
T 3.3.2.-2

Víte, kde leží severní a jižní pól zemského magnetického pole?

Země má vlastní magnetické pole, které vzniká v jejím jádře. Na zemském povrchu ho můžeme zjistit kompasem. Je to v podstatě tenký tyčový magnet (střelka), který je volně otáčivý ve vodorovné rovině. Střelka se natočí, protože její severní pól je přitahován k

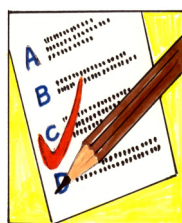
jižnímu pólu zemského magnetického pole. Natočí se k Arktidě. Tedy jižní pól zemského magnetického pole se musí nacházet v oblasti Arktidy. Protože se však v Arktidě nachází severní geografický pól, bylo dohodnuto užívat pro tento jižní magnetický pól termín **severní geomagnetický pól**.

Na O 3.3.2.-4 je M magnetická osa a R zemská osa.



O 3.3.2.-4

Magnetické pole Země se pomalu mění. Během $10^5 - 10^7$ let dokonce mění magnetické pole Země i svůj směr.



KO 3.3.2.-1. Na severní polokouli magnetické indukční čáry zemského magnetického pole

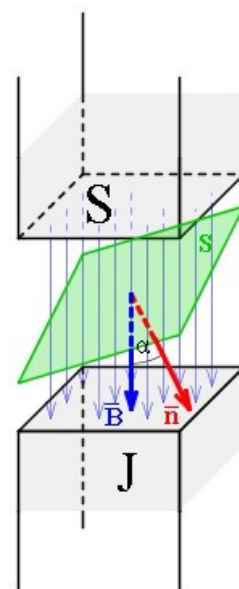
- a) vcházejí do Země směrem k Arktidě
- b) vycházejí ze Země v oblasti Arktidy

?

KO 3.3.2.-2. Na jižní polokouli magnetické indukční čáry zemského magnetického pole

- a) vcházejí do Země směrem k Antarktidě
- b) vycházejí ze Země v oblasti Antarktidy

?



O 3.3.2.-5



T 3.3.2.-3

S magnetickou indukcí $\mathbf{B}$ souvisí velmi důležitá skalární veličina **magnetický indukční tok Φ_m** .

Na O 3.3.2.-5 je mezi pólovými nástavci permanentního magnetu umístěna rovinná plocha (např. plocha rovinného závitu).

Předpokládejme, že magnetické pole mezi nástavci je homogenní, indukční čáry jsou rovnoběžné, jejich hustota je konstantní a směřují od severního pólu

S k jižnímu pólu J. V homogenním magnetickém poli je definován magnetický indukční tok, jdoucí zvolenou plochou, vztahem

$$\Phi_m = B \cdot S \cos \alpha$$

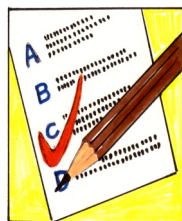
V 3.3.2.-1

kde • S je obsah rovinné plochy

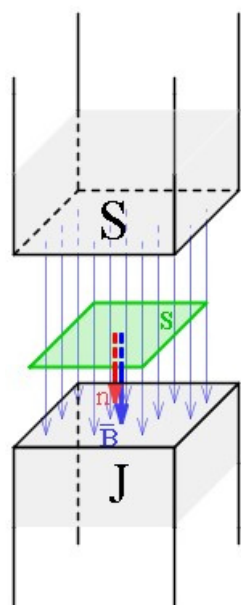
• B je indukce magnetického pole, ve kterém se plocha nachází

• α je úhel, který svírá vektor **B** s vektorem normály (tj.s kolmicí k ploše) **n**

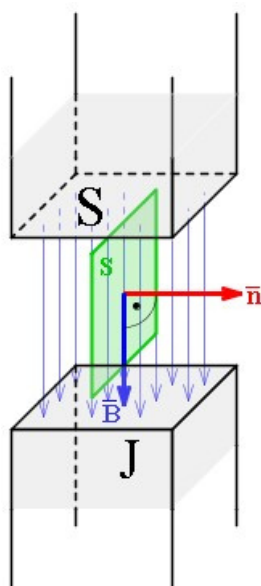
Jednotkou indukčního toku je **weber (Wb)**.



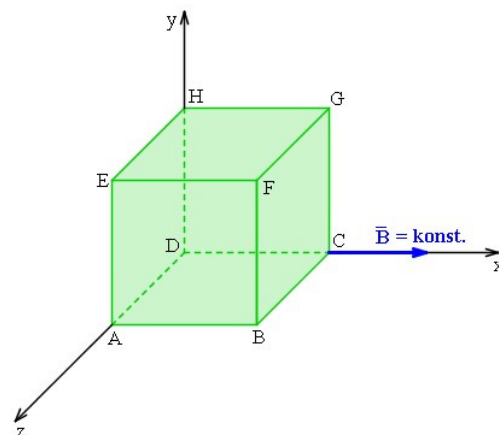
KO3.3.2.-3. Prohlédněte si O 3.3.2.-6. Jaký úhel svírají vektory **B** a **n** ?



O 3.3.2.-6



O 3.3.2.-7



O 3.3.2.-9

KO 3.3.2.-4. Prohlédněte si O 3.3.2.-6. Použijte vztahu V 3.3.2.-1 a запиšte velikost indukčního toku plochou S.

?

KO 3.3.2.-5. Prohlédněte si O 3.3.2.-7. Jak velký je indukční tok plochou S v tomto případě ?

?

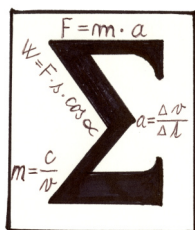
KO 3.3.2.-6. Krychli o hraně 0,5 m umístíme do homogenního magnetického pole indukce 2 T (O 3.3.2.-9). Vypočítejte magnetický indukční tok stěnou ADHE a nezapomeňte uvést jednotku.

?

KO 3.3.2.-7. Krychli o hraně 0,5 m umístíme do homogenního magnetického pole indukce

2 T (O 3.3.2.-9). Určete magnetický indukční tok stěnou ABFE a nezapomeňte uvést jednotku.

?



Magnetické pole znázorňujeme pomocí **magnetických indukčních čar**. Indukční čáry jsou uzavřené křivky. Vycházejí ze severního pólu magnetu a vstupují do jižního pólu magnetu. Opačné póly magnetu se přitahují, souhlasné se odpuzují.

Homogenní magnetické pole je charakterizováno konstantní indukcí **B** a proto jsou zde indukční čáry rovnoběžné a jejich hustota je konstantní.

S magnetickou indukcí **B** těsně souvisí skalární veličina magnetický

indukční tok

Φ_m , který je definován vztahem

$$\Phi_m = B \cdot S \cos \alpha$$

V 3.3.2.-1

Jednotkou magnetického indukčního toku je **weber** (Wb).

3.3.3. Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli



- diskutovat pohyb částice (Q, m) v magnetickém poli v souvislosti s úhlem pod kterým částice do pole vstupuje
- umět vypočítat poloměr kružnice, po které se částice v magnetickém poli pohybuje
- popsat fyzikální princip hmotnostního spektrometru



3 hodiny



Newtonův zákon síly a zákon setrvačnosti. Pohyb rovnoměrný přímočarý, pohyb rovnoměrný kruhový. Dostředivá síla, dostředivé zrychlení. Pohyb nabitě částice v elektrickém poli.



T 3.3.3.-1

Budeme předpokládat, že částice (Q,m) se nachází v homogenním magnetickém poli, tedy vektor magnetické indukce $\mathbf{B}$ je konstantní.

Máme-li diskutovat pohyb nabitých částic v magnetickém poli, musíme vědět, že magnetické pole působí na částici (Q,m) silou

- jejíž velikost je podle V 3.3.1.-1 $F_m = Q \cdot v \cdot B \sin \alpha$
- jejíž směr je kolmý na vektory $\mathbf{v}$ a $\mathbf{B}$.

Úlohu budeme řešit pro tři případy:

- $\alpha = 0^\circ$ (tj. vektory $\mathbf{v}$ a $\mathbf{B}$ jsou rovnoběžné)
- $\alpha = 90^\circ$ (tj. vektory $\mathbf{v}$ a $\mathbf{B}$ jsou kolmé)
- $0 < \alpha < 90^\circ$

T 3.3.3.-2

Na O 3.3.3.-1 vidíte částici (Q,m) , která vnikla do magnetického pole indukce $\mathbf{B} = \text{konst.}$ tak, že vektor její rychlosti $\mathbf{v}$ je rovnoběžný s vektorem $\mathbf{B}$.

Ze vztahu V 3.3.1.-1 vyplývá, že velikost síly $F_m = 0 \text{ N}$ a tedy vektor $\mathbf{F}_m = \mathbf{0}$

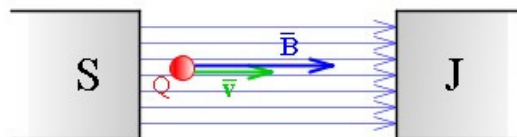
Podle Newtonova zákona síly platí $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$

tedy v našem případě $\mathbf{0} = m \cdot \mathbf{a}$

z toho plyne $\mathbf{a} = \mathbf{0}$

a z toho plyne $\mathbf{v} = \text{konst.}$

Tedy : částice (Q,m) setrvává v rovnoměrném přímočarém pohybu.



O 3.3.3.-1

T 3.3.3.-3

Přemýšleli jste někdy o tom, jak se měří hmotnosti takových částic jako je proton ($m \sim 10^{-27} \text{ kg}$) nebo elektron ($m \sim 10^{-31} \text{ kg}$) ?

Nejprve si připomeňme několik poznatků, se kterými jste se seznámili v mechanice.

Rychlost je vektor a je tedy definována velikostí a směrem. O rovnoměrném pohybu po kružnici hovoříme tehdy, pohybuje-li se těleso po kružnici rychlostí o stálé velikosti v . Zrychlení tělesa ovšem není nulové, protože dochází ke změně směru rychlosti (rychlost má v každém okamžiku směr tečny ke kružnici). Těleso se pohybuje se zrychlením

(**dostředivým zrychlením**), které směřuje trvale do středu kružnice a má konstantní velikost

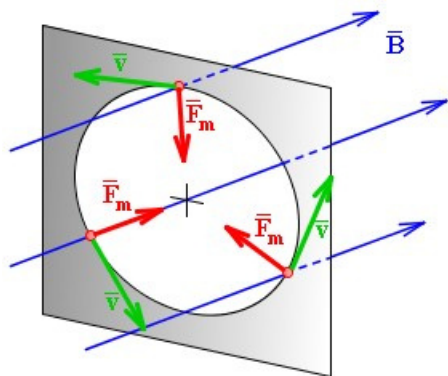
$$a = \frac{v^2}{R}$$

obr. 3.3.3.-2

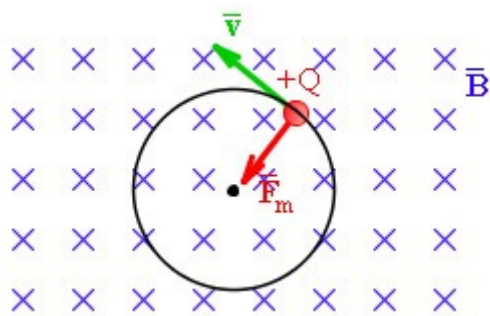
Dostředivé zrychlení udílí tělesu **dostředivá síla**, která směřuje rovněž do středu kružnice. Její velikost je konstantní a pomocí Newtonova zákona síly ji lze vyjádřit ve tvaru

$$F = m \cdot a = m \cdot v^2 / R$$

Jestliže má tedy výslednice sil působících na těleso charakter dostředivé síly pohybuje se těleso rovnoměrně po kružnici.



O 3.3.3.-2



O 3.3.3.-3

Na O 3.3.3.-2 vidíte částici (Q,m) , která vnikla do magnetického pole indukce $\mathbf{B} = \text{konst.}$ tak, že vektor její rychlosti $\mathbf{v}$ je kolmý na vektor $\mathbf{B}$. Jiný pohled na stejnou situaci vidíte na O 3.3.3.-3. Směr síly $\mathbf{F}_m$ určíme pomocí pravidla levé ruky, které je uvedeno v kapitole 3.3.1. Síla, kterou magnetické pole působí na pohybující se částici (Q,m) , je kolmá jak k rychlosti $\mathbf{v}$ částice, tak i k magnetické indukci $\mathbf{B}$. Nemá vliv na velikost rychlosti částice, ale mění její směr, působí jako dostředivá síla zakřivující trajektorii částice do kruhového oblouku poloměru R

Bude tedy platit :

dostředivá síla = F_m

$$m \frac{v^2}{R} = Q \cdot v \cdot B \quad \text{V 3.3.3.-1}$$

Tedy : částice (Q,m) bude v tomto případě rotovat s konstantní rychlostí v po kružnici poloměru R .

Z rovnice V 3.3.3.-1 po úpravě dostaneme pro poloměr trajektorie vztah

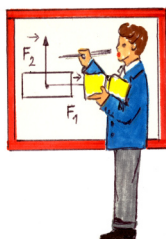
$$R = \frac{m \cdot v}{Q \cdot B} \quad \text{V 3.3.3.-2}$$

nebo pro hmotnost částice

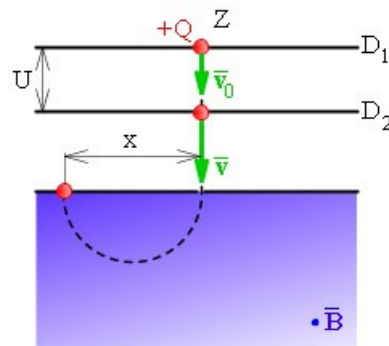
$$m = \frac{R \cdot Q \cdot B}{v}$$

V 3.3.3.-3

A nyní již znáte „know how“ jak změřit hmotnost elektronu.



RU 3.3.3.-1. Na O 3.3.3.-4 vidíte velmi zjednodušeně znázorněn princip hmotnostního spektrometru, který slouží k měření hmotnosti iontů. Iont o neznámé hmotnosti m s nábojem $Q = +1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ vzniká ve zdroji Z . Dále je urychlen elektrickým polem, které je mezi deskami



O 3.3.3.-4

D₁, D₂. Napětí na deskách je $U = 1000 \text{ V}$. Iont s rychlostí v vlétá štěrbinou do komory, ve které na něj působí homogenní magnetické pole $\mathbf{B}$, kolmé k jeho rychlosti ($\mathbf{B}$ je kolmé k obrázku a směřuje na nás). Velikost magnetické indukce $B = 80 \text{ mT}$.

Magnetické pole způsobí, že se iont bude pohybovat po kružnici. Po opsání půlkružnice dopadne na fotografickou desku ve vzdálenosti $x = 1,6254 \text{ m}$ od štěrbin a exponuje ji.

Vypočítejte hmotnost iontu.

Řešení:

$$Q = +1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}, U = 1000 \text{ V}, B = 0,08 \text{ T}, x = 1,6254 \text{ m}$$

Nejprve musíme vyřešit rychlost, se kterou iont vstupuje do magnetického pole. Tato otázka byla řešena v RU 3.1.6.-4.

$$\text{Podle V 3.1.6.-9} \quad v = (2 \cdot Q \cdot U / m)^{0,5} \quad (\text{a})$$

S touto rychlostí vstupuje iont do magnetického pole a opíše půlkružnici o poloměru

$$R = x/2 \quad (\text{b})$$

a bude pro něj platit rovnice V 3.3.3.-1

$$m \cdot v^2 / R = Q \cdot v \cdot B$$

po úpravě dostaneme rovnici ve tvaru

$$m \cdot v / R = Q \cdot B$$

do této rovnice dosadíme vztahy (a) a (b)

$$\frac{2 \cdot m}{x} \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot U}{m}} = Q \cdot B$$

a po úpravě dostaneme:

$$m = Q \cdot B^2 \cdot x^2 / (8U)$$

$$\text{Dosadíme: } m = 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 0,08^2 \cdot 1,6254^2 / (8 \cdot 10^3) = 3,3863 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

Hmotnost zkoumaného iontu je $m = 3,3863 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$.

RU 3.3.3.-2. Elektrony urychlené v elektrickém poli potenciálním rozdílem 100 V vstupují do homogenního magnetického pole s magnetickou indukcí $1 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ kolmo k indukčním čarám. Elektrony se budou v magnetickém poli pohybovat po kružnici.

a) Vypočítejte poloměr kružnice.

b) Vypočítejte periodu T (dobu oběhu).

c) Vypočítejte frekvenci f (tj. počet oběhů za jednu sekundu).

Řešení:

$$U = 100 \text{ V}, B = 1 \cdot 10^{-4} \text{ T}, m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}, Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

a) Nejdříve musíme vyřešit rychlost elektronů. Elektrony jsme urychlili elektrickým polem, v němž elektron získá kinetickou energii $Q \cdot U$ (viz. RU 3.1.6.-4). Pro rychlost elektronu tedy platí

$$v = (2 \cdot Q \cdot U / m)^{0,5}$$

- Dosad'te numericky $v =$

?

- S touto rychlostí vstupují elektrony do homogenního magnetického pole kolmo k indukčním čarám. Magnetické pole působí na elektrony silou velikosti F_m , která působí jako dostředivá síla.

Zapište matematicky: dostředivá síla $= F_m(\text{max})$

?

- Z rovnice vyjádřete poloměr R

?

Dosad'te numericky

?

b) A nyní máme vypočítat periodu T . Elektrony se budou pohybovat rovnoměrným pohybem po kružnici. Z mechaniky víte, že pro rovnoměrný pohyb je velikost rychlosti

$$v = \text{dráha} / \text{čas}$$

V případě pohybu po kružnici je

$$v = \text{obvod kružnice} / \text{perioda } T$$

tedy

$$v = 2\pi R/T \quad \text{a pro hledanou periodu platí } T = 2\pi R/v$$

- Dosadíte : $T =$

?

c) Poslední úkol je vypočítat frekvenci f , tedy počet oběhů za jednu sekundu.

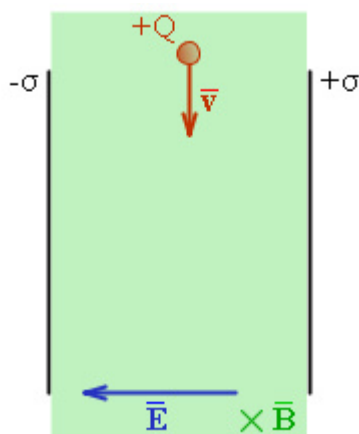
Frekvence f je $f = 1/T$

a po dosazení $f = 2,8 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ resp. $2,8 \cdot 10^6 \text{ Hz}$.

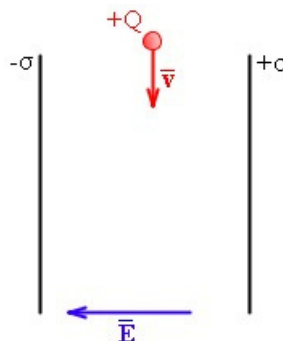
RU 3.3.3.-3. Uvažujme oblast zkřížených homogenních polí $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$, tj. v dané oblasti platí, že vektor elektrické intenzity $\mathbf{E}$ je kolmý na vektor magnetické indukce $\mathbf{B}$. $E = 1,5 \text{ kV.m}^{-1}$, $B = 0,4 \text{ T}$. Do tohoto zkříženého pole vstupují protony s rychlostí $\mathbf{v}$ tak, že vektor $\mathbf{v}$ je kolmý jak k vektoru $\mathbf{E}$ tak i k vektoru $\mathbf{B}$, jak vidíte na obrázku O 3.3.3.-6a.

Jak velkou rychlost musí mít protony, aby se ve zkříženém poli pohybovaly po přímce?

Řešení: $E = 1,5 \cdot 10^3 \text{ V.m}^{-1}$, $B = 0,4 \text{ T}$



O 3.3.3.-6a



O 3.3.3.-7a

Úlohu budeme řešit postupně.

1) Uvažujte pouze homogenní elektrické pole, které realizujeme mezi nabitými deskami tak jak to vidíte na obr. 3.3.3.-7a. Vektor $\mathbf{E}$ má směr od kladné desky k záporné. Elektrické pole intenzity $\mathbf{E}$ působí na proton, jehož náboj označme Q , silou $\mathbf{F}_e$.

- Nakreslete vektor $\mathbf{F}_e$.

?

- Zapište velikost síly $F_e =$

?

A nyní uvažujme pouze homogenní magnetické pole. Magnetická indukce $\mathbf{B}$ míří do O 3.3.3.-8a. Magnetické pole působí na pohybující se proton silou $\mathbf{F}_m$.

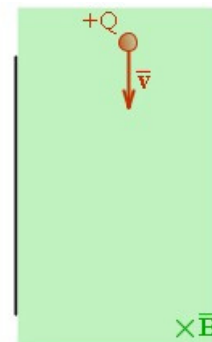
Nakreslete vektor $\mathbf{F}_m$.

?

Zapište velikost síly F_m .

?

O 3.3.3.-6a



A nyní se vraťte k O 3.3.3.-6a. V prostoru mezi deskami máme nyní obě pole: elektrické intenzity $\mathbf{E}$ a magnetické indukce $\mathbf{B}$. Kolik sil působí na proton (gravitační sílu neuvažujeme)?

?

Nakreslete je.

?

Nyní již můžete odpovědět na otázku: Jak velkou rychlost musí mít protony, aby se ve zkříženém poli pohybovaly po přímce? Jakou podmínku musí splňovat obě síly, aby se proton nevychýlil ani ke kladné ani k záporné desce?

?

Jaká je tedy hledaná rychlost? $v =$

?

Numericky: $v = 1,5 \cdot 10^3 / 0,4$ $v = 3,75 \cdot 10^3$ m/s

Pokud budou protony vstupovat do zkříženého pole s touto rychlostí, budou se pohybovat po přímce.

Pokud bude jejich rychlost $v < E/B$, budou protony zachyceny na

a) kladné desce

b) záporné desce

?

Pokud bude jejich rychlost $v > E/B$, budou protony zachyceny na

a) kladné desce

b) záporné desce

?

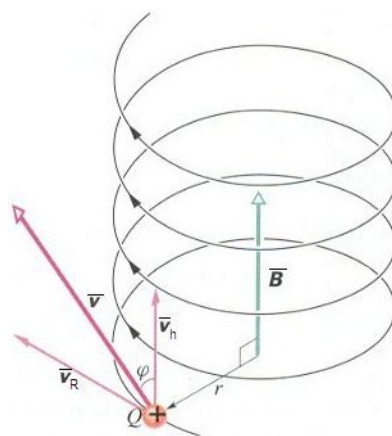
Pokud jste odpověděli na všechny otázky samostatně a dobře, můžete být se sebou spokojeni. Právě jste popsali funkci velmi důležitého zařízení, kterému říkáme **rychlostní filtr**. Používá se všude tam, kde potřebujeme svazek nabitých částic stejné rychlosti (hmotnostní spektrometr, televizní obrazovka, atd.). Filtrem projdou přímočaře částice, které mají rychlost $v = E/B$. Částice, které mají odlišnou rychlost jsou ze svazku vyfiltrovány.



T 3.3.3.-4

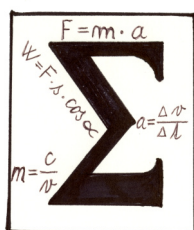
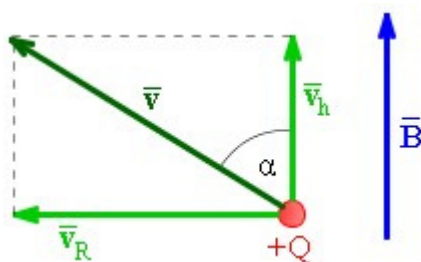
K diskusi nám zbývá poslední případ, tj. když částice (Q, m) vstupuje do homogenního pole tak, že vektor její rychlosti $\mathbf{v}$ svírá s magnetickou indukcí $\mathbf{B}$ úhel α , pro který platí $0^\circ < \alpha < 90^\circ$.

Situaci vidíte na O 3.3.3.-5a a O 3.3.3.-5b. Částice se bude pohybovat po šroubovici. Vektor rychlosti $\mathbf{v}$ je rozložen vzhledem ke směru $\mathbf{B}$ do dvou směrů – kolmé $\mathbf{v}_R$ a rovnoběžného $\mathbf{v}_h$. Velikost kolmé složky v_R určuje poloměr šroubovice a velikost rovnoběžné složky v_h stoupání šroubovice.



O 3.3.3.-5b

O 3.3.3.-5a



Částice (Q, m) , tedy nabitá částice o hmotnosti m s nábojem Q , která se pohybuje rychlostí $\mathbf{v}$ v homogenním magnetickém poli indukce $\mathbf{B}$, se může pohybovat :

- rovnoměrným přímočarým pohybem. Bude to v případě, když rychlost částice $\mathbf{v}$ je rovnoběžná s vektorem indukce $\mathbf{B}$.
- rovnoměrným pohybem po kružnici. Bude to v případě, kdy rychlost částice $\mathbf{v}$ je kolmá na vektor indukce $\mathbf{B}$.

Síla, kterou magnetické pole působí na částici, působí jako dostředivá síla.

$$m \frac{v^2}{R} = Q \cdot v \cdot B \quad \text{V 3.3.3.-1}$$

Z této rovnice můžeme vyjádřit poloměr kružnice R , respektive hmotnost částice m a dále periodu pohybu T nebo frekvenci f .

- po šroubovici. Bude to v případě, kdy rychlost částice $\mathbf{v}$ svírá s magnetickou indukcí $\mathbf{B}$ úhel α , pro který platí $0 < \alpha < \pi/2$.

3.3.4. Síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli



- popsat silové působení magnetického pole na vodič s proudem
- vědět, že magnetická indukce charakterizuje silové působení magnetického pole na vodič s proudem

- umět určit směr magnetické síly působící na vodič s proudem (Flemingovo pravidlo)
- popsat chování smyčky s proudem, která je umístěná v magnetickém poli (princip elektromotoru)



3 hodiny



Rovnoměrný pohyb. Rovnoměrně zrychlený pohyb. Newtonův zákon síly. Definice proudu I . Definice síly F_m magnetického pole na pohybující se náboj. Moment dvojice sil.

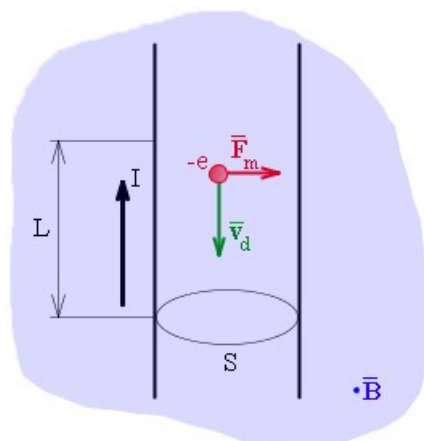


T 3.3.4.-1

Na obrázku O 3.3.4.-1 vidíte část vodiče, kterým prochází proud I .

Vodič je umístěn v homogenním magnetickém poli indukce B .

Indukce je kolmá na rovinu obrázku a míří na vás. Prochází-li vodičem proud, vodivostní elektrony se pohybují usměrněným pohybem unášivou (driftovou) rychlostí v_d . Elektrický proud prochází směrem nahoru, což znamená, že elektrony se pohybují driftovou rychlostí směrem dolů (směrem elektrického proudu ve vodiči nazýváme podle dohody směr uspořádaného pohybu **kladně** nabitých nosičů náboje).



O 3.3.4.-1

Sledujme jeden vybraný vodivostní elektron. Jde o částici se záporným nábojem e , která se pohybuje driftovou rychlostí v homogenním magnetickém poli. Magnetické pole působí na každý elektron silou, jejíž velikost je podle V 3.3.1.-1

$$|F_m| = e \cdot v_d \cdot B \sin \alpha$$

Na O 3.3.4.-1 je nakreslena situace pro $\alpha = 90^\circ$, tj. v našem případě můžeme psát

$$F_m = e \cdot v_d \cdot B$$

Směr síly F_m určíme podle pravidla levé ruky (– indukce do dlaně – prsty ve směru driftové rychlosti – vztyčený palec ukáže směr F_m působící na **kladný** náboj, ale pozor!) V našem případě se pohybuje záporný elektron a proto síla F_m působí opačně. Tato síla působí na každý vodivostní elektron. Protože vodivostní elektrony nemohou vodič opustit, přenáší se tato síla na samotný vodič.

Magnetické pole působí silou (tzv. **Ampérovou silou**) na vodič, kterým prochází elektrický proud, po celou dobu, po kterou prochází elektrický proud ve vodiči, a pokud trvá magnetické pole.

Pravidlo levé ruky, které jsme používali pro určení směru síly F_m můžeme nyní formulovat takto:

Otevřenou levou ruku položte tak, aby

- prsty ukazovaly směr proudu (tedy směr pohybu kladného náboje)
- indukce B vstupovala do dlaně
- vztyčený palec ukazuje směr síly F_m , kterou magnetické pole působí na vodič s proudem I . Toto pravidlo je známo jako **Flemingovo pravidlo levé ruky**.

Uvažujme úsek L přímého vodiče na O 3.3.4.-1. Vodičem prochází konstantní proud I , vodivostní elektrony se pohybují driftovou rychlostí v_d . Necht' dráhu L (část vodiče) urazí elektrony za dobu t .

Protože $v_d = L/t$, budou se vodivostní elektrony v úseku L pohybovat kolmo k průřezu S po dobu

$$t = L/v_d \quad (a)$$

Za tuto dobu projde průřezem S n elektronů, jejichž celkový náboj je $Q = n.e$.

Z rovnice V 3.2.1.-2

$$I = Q/t \quad \text{plyne}$$

$$Q = I.t \quad (b)$$

Jestliže na jeden elektron působí magnetické pole silou

$$F_m = e.v_d.B$$

potom na n elektronů působí magnetické pole silou

$$F_m = n.e.v_d.B = Q.v_d.B \quad (c)$$

Dosadíme-li vztahy (a) a (b) do rovnice (c) dostaneme

$$F_m = B.I.L \quad \text{V 3.3.4.-1}$$

Tato rovnice definuje velikost síly, kterou působí magnetické pole o indukci B na přímý vodič délky L s proudem I za předpokladu, že indukce B je kolmá k vodiči.

Pokud indukce B svírá s vodičem úhel α , působí magnetické pole na vodič silou

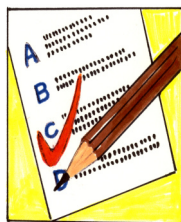
$$F_m = B.I.L \sin \alpha \quad \text{V 3.3.4.-2}$$

Vztah V 3.3.4.-1 definuje maximální sílu $F_m(\max)$, tj. pro $\alpha = 90^\circ$ ($\sin 90^\circ = 1$)

Pro velikost magnetické indukce plyne z rovnice V 3.3.4.-1

$$B = \frac{F_m(\max)}{I.L} \quad \text{V 3.3.4.-3}$$

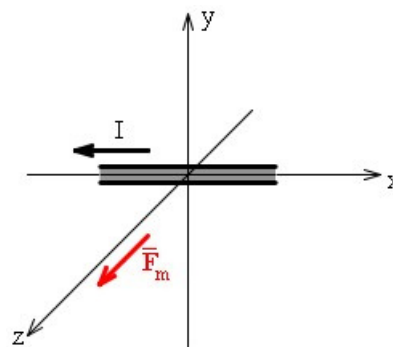
Velikost magnetické indukce můžeme tedy definovat vztahem V 3.3.1.-2 a V 3.3.4.-3. Jako definičního vztahu používáme častěji vztah V 3.3.4.-3, protože je snadnější měřit sílu magnetického pole na vodič s proudem než sílu působící na pohybující se částici.



KO 3.3.4.-1. Sledujte O 3.3.4.-1. Jak se změní síla F_m pokud změňte směr proudu ? Proud I prochází směrem dolů.

Velikost síly

- a) se zvětší
 - b) se zmenší
 - c) zůstane stejná
- ?



KO 3.3.4.-2. Sledujte O 3.3.4.-1. Jak se změní směr síly F_m pokud změňte směr proudu, tj. proud I prochází směrem dolů.

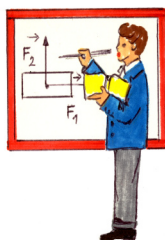
Směr síly

- a) zůstane stejný, tj. $\rightarrow$
 - b) bude opačný, tj. $\leftarrow$
- ?

O 3.3.4.-2

KO 3.3.4.-3. Na O 3.3.4.-2 je zakreslen vodič, kterým prochází proud I , nacházející se v magnetickém poli indukce B , a Ampérova síla F_m působící na vodič. Magnetické pole je orientováno tak, že síla je maximální. Jaký směr má magnetická indukce ?

?

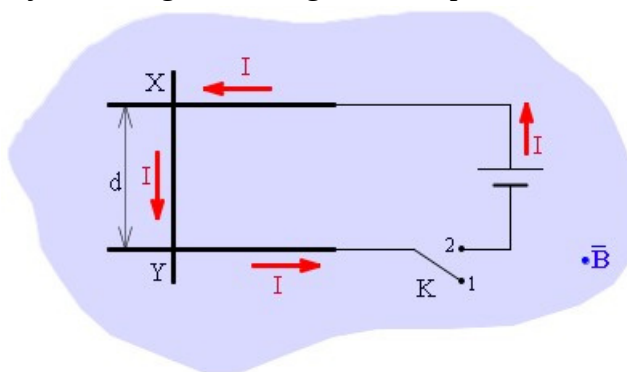


RU 3.3.4.-1. Kovový vodič XY může klouzat bez tření po dvou vodorovných kolejnicích, které jsou ve vzdálenosti d , jak vidíte na obrázku O 3.3.4.-3. Celá soustava je v homogenním magnetickém poli o indukci B .

Její směr vidíte na obrázku (míří na vás). V obvodu je zapojen zdroj. Pokud

je klíč K v poloze 1, neprochází obvodem proud a v obvodu se nic neděje. Pokud zapneme klíč K do polohy 2, prochází obvodem stejnosměrný proud I a kovový vodič délky d začne klouzat po kolejnicích. Proč?

Tuto úlohu si prostudujte **velmi pečlivě**. Později se k ní ještě vrátíme.



O 3.3.4.-3

Řešení:

Homogenní magnetické pole indukce B působí na vodič délky L , kterým prochází proud I , Ampérovou silou F_m , jejíž velikost je podle V 3.3.4.-2

$$F_m = B.I.L \sin \alpha$$

V našem případě je délka vodiče XY, který má možnost se pohybovat, rovna d . Úhel, který svírá vodič XY s indukcí B je 90° . Pro velikost Ampérovy síly bude platit vztah V 3.3.4.-1 ve tvaru

$$F_m = B.I.d$$

Tato síla způsobí pohyb vodiče, vodič bude klouzat po kolejnicích.

Kterým směrem se bude vodič XY pohybovat ?

- a) doprava, směrem ke zdroji $\rightarrow$
- b) doleva, směrem od zdroje $\leftarrow$
- ?

Co musíte udělat, aby se vodič XY pohyboval opačným směrem ?
?

Jakým pohybem se bude pohybovat vodič XY ?

- a) rovnoměrně zrychleným přímočarým
- b) rovnoměrným přímočarým
- c) nerovnoměrným přímočarým
- ?

Předpokládejte, že hmotnost vodiče XY je m . Tření neuvažujte. Určete zrychlení, se kterým se bude vodič pohybovat.
?

Určete velikost rychlosti jako funkci času (nezapomeňte, že jde o rovnoměrně zrychlený pohyb) za předpokladu, že v čase $t = 0$ s byl vodič v klidu.
?



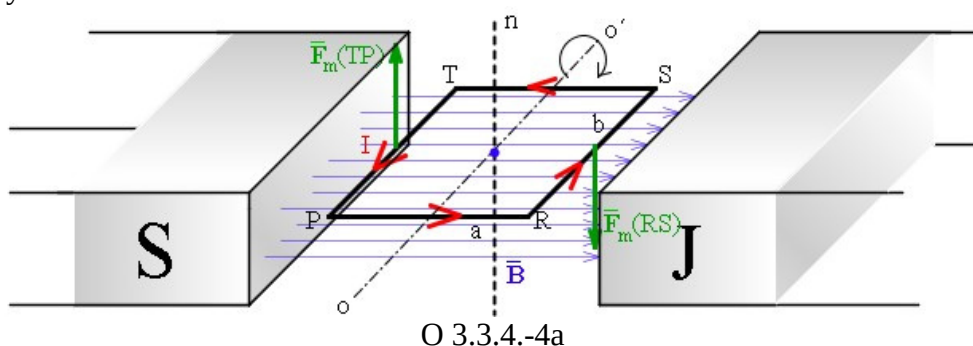
T 3.3.4.-2

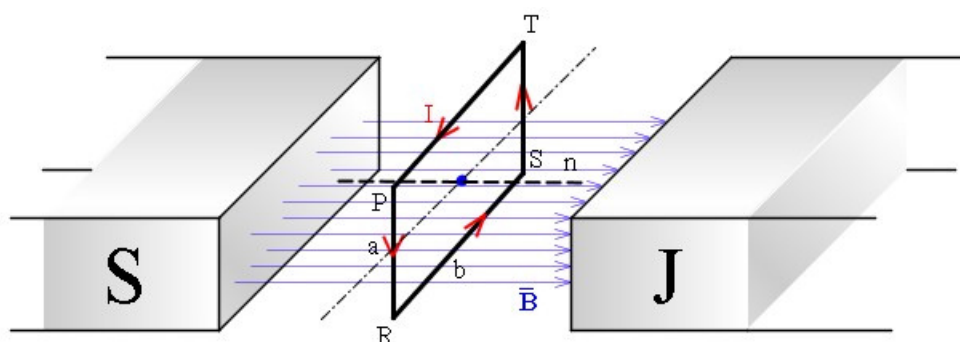
Umíte si představit život bez toho, že bychom nevyužívali práci elektrických motorů?

Na jakém principu pracují?

Práci konají síly, kterými magnetické pole působí na vodič s proudem.

Uvažujme nedeformovatelnou obdélníkovou smyčku PRST, kterou prochází elektrický proud I . Její strany mají velikosti a a b . Smyčka je umístěná v homogenním magnetickém poli indukce $\mathbf{B}$. Na O 3.3.4.-4a a O 3.3.4.-4b vidíte uvažovanou smyčku ve dvou různých polohách. Vodiče, přivádějící proud do smyčky a ven z ní pro přehlednost nejsou na obrázcích zakresleny. Smyčka se může volně otáčet kolem pevné osy OO' .





O 3.3.4.-4b

1) Zkoumejme nejdříve smyčku na O 3.3.4.-4a., tj. **normála plochy smyčky n je kolmá na indukci B** . Strany PR a ST jsou rovnoběžné s vektorem B a strany RS a TP jsou kolmé na vektor B . Síla, působící na uzavřený obvod s proudem I v magnetickém poli se dá určit součtem sil, které působí na všechny elementy (části), které obvod obsahuje. Stačí jen správně aplikovat rovnici V 3.3.4.-2.

Síly, kterými magnetické pole působí na strany PR a ST mají velikost

$$F_m(PR) = F_m(ST) = 0 \text{ N.}$$

Víte proč?

?

- Nyní se budeme zabývat silami $F_m(RS)$ a $F_m(TP)$ na strany RS a TP. Velikosti těchto sil jsou dány vztahem V 3.3.4.-1 (úhel $\alpha = 90^\circ$).

Síly $F_m(RS)$ a $F_m(TP)$ mají stejnou velikost $F_m(RS) = F_m(TP) = B \cdot I \cdot b$

Pokud jde o jejich směr, ten určíme podle Flemingova pravidla levé ruky. Síly $F_m(RS)$ a $F_m(TP)$ jsou kolmé na rovinu závitu a mají opačný směr. Tyto síly tvoří **dvojici sil** a moment této dvojice sil způsobí **otáčení smyčky** kolem osy OO' . Z mechaniky víte, že velikost momentu M dvojice sil je rovna součinu síly a ramena dvojice sil (v našem případě má rameno velikost a , tj.

$$M = B \cdot I \cdot b \cdot a$$

Pokud si uvědomíme, že součin $a \cdot b = S$ představuje velikost plochy smyčky, můžeme psát

$$M = B \cdot I \cdot S$$

V této uvažované poloze smyčky je moment M největší.

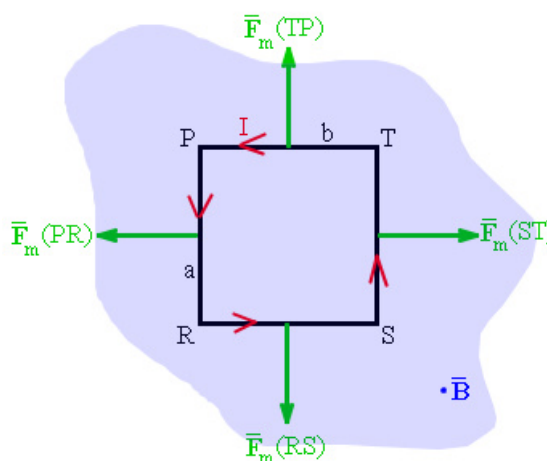
2) Nyní budeme zkoumat smyčku v poloze, kterou vidíte na O 3.3.4.-4b, nebo O 3.3.4.-4c, tj. **normála plochy smyčky n je rovnoběžná s vektorem indukce B** . Strany PR a ST jsou kolmé k vektoru indukce B , stejně tak strany TP a RS.

- Síly $F_m(PR)$ a $F_m(ST)$ mají stejnou velikost $F_m(PR) = F_m(ST) = B \cdot I \cdot a$. Jejich směry vidíte na obr. 3.3.4.-4c, ale pozor! Obě síly leží v rovině nedeformovatelné smyčky. Jejich účinek na smyčku se ruší.

- Síly $F_m(RS)$ a $F_m(TP)$ mají stejnou velikost $F_m(RS) = F_m(TP) = B \cdot I \cdot b$. Jejich směry vidíte na O 3.3.4.-4c. Obě síly leží opět v rovině smyčky a jejich účinek na smyčku se opět ruší.

Smyčka se nebude ani posouvat, ani otáčet.

3) Pokud se smyčka otáčí, mění se úhel β , který svírá normála plochy smyčky s vektorem indukce a v závislosti na tomto úhlu se mění velikost momentu dvojice sil podle rovnice



obr. 3.3.4.-4c

$$M = B.I.S \sin \beta$$

V 3.3.4.-4

Závěr:

Nepřehlízíme-li k poloze smyčky, je otáčivý účinek magnetického pole na obdélníkový závit tím větší

- čím větší je magnetická indukce
- čím větší proud smyčkou protéká
- čím má smyčka větší plochu

Ke stejnému závěru bychom došli i v případě kruhové smyčky a cívky. V případě cívky závisí otáčivý účinek magnetického pole také na počtu závitů. Pro cívku, která má N závitů bude (podle V 3.3.4.-4) platit

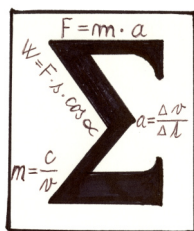
$$M = N.B.I.S \sin \beta$$

V 3.3.4.-5



T 3.3.4.-3

Na tomto principu mohou také pracovat analogové ampérmetry a voltmetry. Pracují tak, že měří silový moment M , kterým působí magnetické pole na cívku s měřeným proudem. Stejnoseměrnému proudu I v cívce odpovídá jednoznačně určitá úhlová výchylka ručičky přístroje.



Na přímý vodič délky L s proudem I , který se nachází v homogenním magnetickém poli o indukci B , působí **Ampérova síla**.

- Její **velikost** závisí - na délce vodiče L
- na proudu I
- na velikosti indukce B
- na úhlu, který svírá vodič s vektorem B

$$F_m = B.I.L \sin \alpha \quad \text{V 3.3.4.-2}$$

Pokud je vodič kolmý na vektor indukce B , tj. pro $\alpha = 90^\circ$ ($\sin 90^\circ = 1$), můžeme V 3.3.4-2 zapsat takto

$$F_m(\max) = B.I.L \quad \text{V 3.3.4.-1}$$

Pro velikost magnetické indukce plyne z rovnice V 3.3.4.-1

$$B = \frac{F_m(\max)}{I.L} \quad \text{V 3.3.4.-3}$$

- **Směr** Ampérových sil určíme Flemingovým pravidlem levé ruky.

Na smyčku s proudem I působí magnetické pole o indukci B momentem síly, pro jehož velikost platí vztah V 3.3.4.-4.

$$M = B.I.S \sin \beta \quad \text{V 3.3.4.-4}$$

Otáčivý účinek magnetického pole na smyčku závisí na

- velikosti magnetické indukce B
- proudu I , který smyčkou prochází
- na velikosti plochy smyčky S

Velikost momentu síly M závisí také na okamžité poloze smyčky v magnetickém poli, tj na úhlu, který svírá normála n plochy smyčky s vektorem B .

3.4. Vznik magnetického pole



T 3.4.0.-1

Již v úvodu ke kapitole 3.3. jsme hovořili o tom, že původ kteréhokoli magnetického pole kolem nás můžeme vysvětlit jedním ze dvou mechanismů :

- 1) Pohybující se elektricky nabitě částice vytvářejí ve svém okolí magnetické pole.
- 2) Magnetické pole látky má původ v magnetických vlastnostech atomů. Elementární částice s nábojem, ze kterých se skládá atom (zejména elektrony), mají kolem sebe magnetické pole. Tato magnetická pole se skládají tak, že
 - vytvářejí navenek výrazné magnetické pole (feromagnetické látky)
 - se vyruší a žádné výraznější magnetické pole jako výsledek nevznikne (paramagnetické a diamagnetické látky).

3.4.1. Magnetické pole elektrického proudu



- vědět, že příčinou magnetického pole je pohyb částic s elektrickým nábojem
- umět charakterizovat magnetické pole přímého vodiče a cívky
- v obou případech umět vypočítat velikost indukce
- v obou případech popsat průběh indukčních čar, umět určit směr indukčních čar
- na příkladech umět aplikovat Ampérovo pravidlo pravé ruky
- charakterizovat vzájemné silové působení rovnoběžných vodičů s proudem
- umět vypočítat velikost a směr této síly
- znát definici jednotky proudu – ampér



3 hodiny



Definice síly F_m magnetického pole na pohybující se náboj. Indukční tok Φ .



T 3.4.1.-1

Pohybující se elektricky nabitě částice vytvářejí ve svém okolí magnetické pole. Pokud vodičem prochází proud, dochází v něm k usměrněnému pohybu nosičů náboje. Elektrickým proudem můžeme vytvořit magnetické pole.

Elektrický proud a jeho magnetické pole existují vždy současně a jsou jen různými projevy elektromagnetického pole.

K popisu magnetického pole potřebujeme znát jeho magnetickou indukci $\mathbf{B}$. Proto se budeme nyní zabývat otázkou jak vyřešíme magnetickou indukci $\mathbf{B}$ pole elektrického proudu.

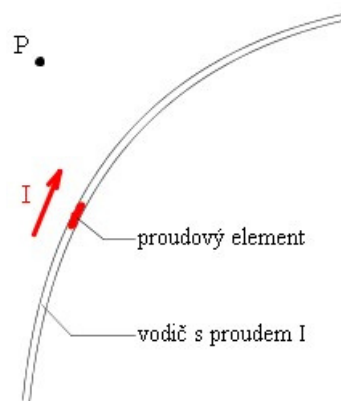
T 3.4.1.-2

Na obrázku O 3.4.1.-1 vidíte vodič obecného tvaru, kterým prochází proud I . Kolem vodiče vzniká magnetické pole.

Jaká bude magnetická indukce $\mathbf{B}$ tohoto pole v bodě P?

Základní postup bude následující:

- Uvažovaný vodič si myšlenkově rozdělíme na nekonečně malé části (délkové elementy). Pokud vodičem prochází proud, můžeme pro stručnost hovořit o **proudovém elementu**. Jeden takový proudový element (vybraný zcela náhodně) vidíte na obrázku. Je vyznačen červeně.



O 3.4.1.-1

- Tento proudový element vytváří magnetické pole, jehož indukce má ve zkoumaném bodě P určitou velikost a směr. Velikost a směr indukce od zmíněného proudového elementu je definována **zákonem Biotovým - Savartovým**.
- Výslednou magnetickou indukci $\mathbf{B}$ od celého vodiče dostaneme tak, že najdeme výslednici všech indukcí, kterými přispívají jednotlivé proudové elementy.

Magnetická indukce $\mathbf{B}$ (velikost a směr) ve zkoumaném bodě P bude záviset

- na **proudu, který vodičem prochází**

- na **tvaru vodiče**

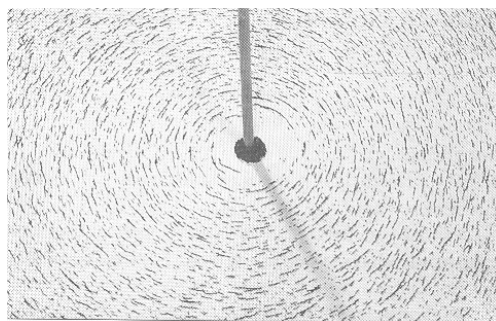
- na **poloze zkoumaného bodu P**.

Řešení této úlohy bez diferenciálního a integrálního počtu však není možné. Proto se v dalším seznámíme pouze s některými výsledky.

T 3.4.1.-3

Dokázali byste popsat obrázku O 3.4.1.-2 ?

?



O 3.4.1.-2

Celou situaci si prohlédněte ještě jednou na O 3.4.1.-3. Dlouhý přímý vodič je kolmý na rovinu ρ . Pokud vodičem prochází proud I , vzniká kolem vodiče magnetické pole.

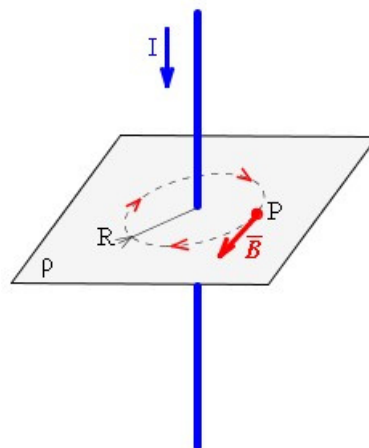
Jaká je indukce B tohoto pole v bodě P ?

Pokud bychom postupovali již zmíněným způsobem (T 3.4.1.-2) za předpokladu, že

- vodičem prochází proud I
- vodič je přímý nekonečně dlouhý (v reálu hodně dlouhý) ve vakuu (přibližně ve vzduchu) a zanedbatelného průřezu
- bod P , ve kterém zkoumáme indukci B , je ve vzdálenosti R od vodiče (rozumí se v kolmé vzdálenosti), dostali bychom následující výsledek:

Velikost indukce magnetického pole, buzeného **přímým, nekonečně dlouhým vodičem** s proudem ve vakuu je

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot R} \quad \text{V 3.4.1.-1}$$



O 3.4.1.-3

V tomto vztahu je μ_0 konstanta nazývaná **permeabilita vakua**. Její hodnota je

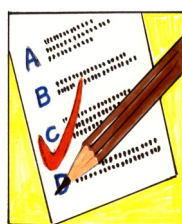
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

Směr indukce magnetického pole buzeného přímým nekonečně dlouhým vodičem určíme **pravidlem pravé ruky**. Uchopte vodič do pravé ruky

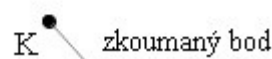
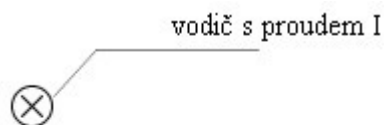
- tak, aby palec ukazoval směr proudu
- zahnuté prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar a tedy i orientaci vektoru B . Tečna k indukční čáře, sestavená ve zkoumaném bodě, určí směr vektoru B v tomto bodě.

Magnetické indukční čáry pole proudu, který prochází dlouhým přímým vodičem, jsou soustředné kružnice se středy ve vodiči.

Pokud bychom uvažovali **tlustý** vodič, potom vztah V 3.4.1.-1 platí pro magnetické pole vně vodiče (vzdálenost R měříme od osy vodiče). Uvnitř vodiče bychom museli postupovat jinak.



KO 3.4.1.-1. Co se změní v obrázku O 3.4.1.-3 v případě, že ve vodiči bude procházet proud opačným směrem ?



O 3.4.1.-4a

KO 3.4.1.-2. Na O 3.4.1.-4a prochází proud I kolmo k rovině obrázku od nás. Jak budete postupovat při stanovení směru indukce B magnetického pole tohoto vodiče v bodě K ?

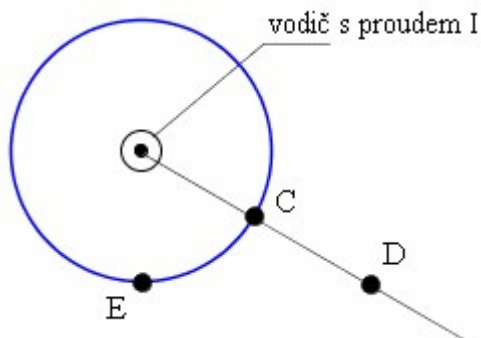
?

KO 3.4.1.-3. Na O 3.4.1.-5 vidíte vodič s proudem I . V jeho magnetickém poli uvažujeme body C, D, E. Velikost magnetické indukce v těchto bodech označíme B_C , B_D , B_E . O těchto velikostech platí:

- a) $B_C > B_D$
- b) $B_C > B_E$
- c) $B_C < B_D$
- d) $B_C = B_E$
- e) $B_C < B_E$

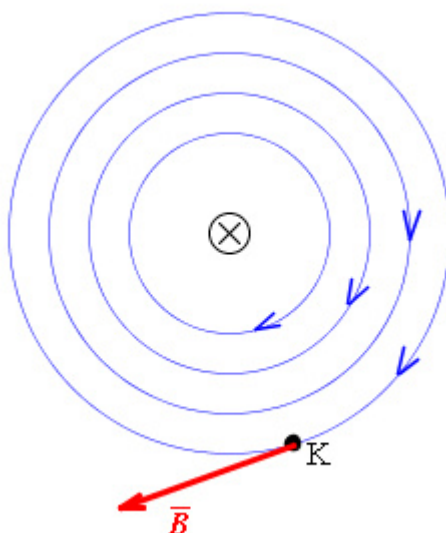
?

O 3.4.1.-5



KO 3.4.1.-4. Student měl za úkol nakreslit indukční čáry a směr indukce $\vec{B}$ v bodě K magnetického pole přímého dlouhého vodiče s proudem I . Co nakreslil vidíte na O 3.4.1.-6. Udělal chybu. Víte, co je v obrázku špatně ?

?

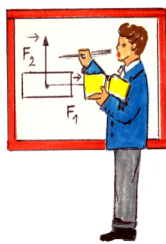


O 3.4.1.-6

KO 4.2.1.-5. Magnetické pole přímého dlouhého vodiče s proudem I je

- a) homogenní
- b) nehomogenní

?



RU 3.4.1.-1. Vypočítejte velikost indukce magnetického pole přímého dlouhého vodiče ve vakuu ve vzdálenosti 2 cm od něho. Vodičem prochází proud 5 A.

Řešení: $I = 5 \text{ A}$, $R = 2 \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m.A}^{-1}$

Podle V 3.4.1.-1 je velikost indukce $B = \mu_0 \cdot I / (2\pi \cdot R)$

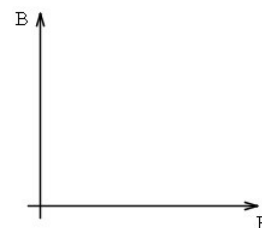
Dosadíme : $B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 / (2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-2}) = 5 \cdot 10^{-5}$

Magnetická indukce má velikost $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.

Pokud bychom měřili velikost indukce ve směru od vodiče, tj. vzdálenost R se zvětšuje, velikost indukce bude klesat. Uděláme-li graf závislosti indukce B na vzdálenosti R (O 3.4.1.-8a), víte jak bude vypadat ?

?

O 3.4.1.-8a

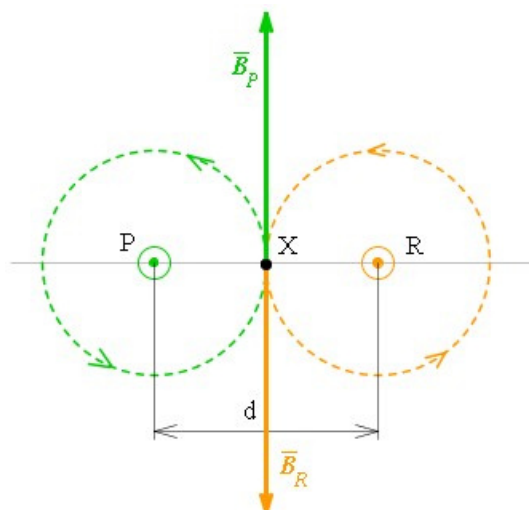


RU 3.4.1.-2. Na O 3.4.1.-14 vidíte dva vodiče P a R. Oběma vodiči prochází proud stejné velikosti a směru, tj. kolmo na rovinu obrázku směrem k vám. Vodiče jsou ve vzdálenosti d . Stanovte indukci B výsledného pole v bodě X, který leží uprostřed mezi oběma vodiči.

Řešení: oba vodiče vytvářejí magnetické pole. V bodě X budeme tedy hledat jejich výslednici. Velikost indukce B_P magnetického pole vodiče P je podle V 3.4.1.-1

$$B_P = \mu_0 I / (2\pi \cdot d/2) = B_R$$

a je rovna velikosti indukce B_R magnetického pole vodiče R (oběma vodiči prochází stejný proud I a mají stejnou vzdálenost od zkoumaného bodu X). Protože magnetická indukce $\mathbf{B}$ je vektor, bude výsledná indukce $\mathbf{B}$ dána **vektorovým součtem** vektorů $\mathbf{B}_P$ a $\mathbf{B}_R$ v bodě X.



O 3.4.1.-14

Směr vektoru $\mathbf{B}_P$ určíme takto:

- sestrojíte indukční kružnici magnetického pole vodiče P. Je to kružnice se středem ve vodiči P a poloměrem $d/2$,
- uchopíte vodič P do pravé ruky tak, aby vztyčený palec ukazoval směr proudu (pozor na vaše oko!). Zahnuté prsty ukazují orientaci indukční čáry a tím i směr indukce $\mathbf{B}_P$ v bodě X. Podobně budeme postupovat i ve druhém případě u vodiče R. Vektory $\mathbf{B}_P$ a $\mathbf{B}_R$ mají v bodě X stejnou velikost, ale opačnou orientaci. Jejich výslednice je nulová. Výsledná indukce v bodě X je $B = 0$ T.



T 3.4.1.-4

Jednotka proudu - ampér- je jedna ze sedmi základních jednotek soustavy SI. Jak je definována ?

Na obrázku O 3.4.1.-9a vidíte přímý dlouhý tenký vodič X, kterým prochází proud I_1 . Magnetické pole vodiče X má ve vzdálenosti R (tedy i v bodě K) magnetickou indukci velikosti B_1 . Napište ji. $B_1 =$

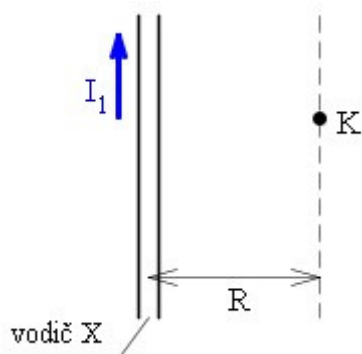
?

Jaký je směr indukce $\mathbf{B}_1$ v bodě K?

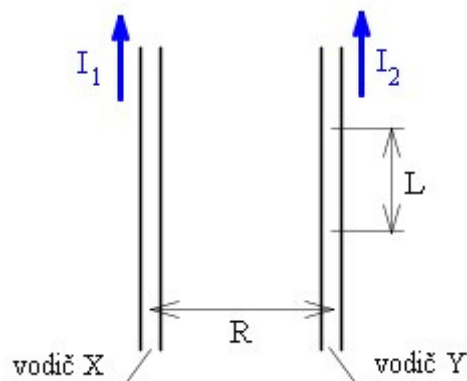
?

A nyní do magnetického pole vodiče X umístíme ve vzdálenosti R druhý vodič Y, kterým prochází proud I_2 tak, že oba vodiče jsou rovnoběžné (O 3.4.1.-9c). Vodič Y se nachází

v magnetickém poli indukce B_1 , které na něj působí Ampérovou silou (viz. T 3.3.4.-1). Na úsek vodiče Y délky L působí magnetické pole indukce B_1 silou, jejíž velikost je $F_m =$?



O 3.4.1.-9a



O 3.4.1.-9c

Pokud dosadíme za B_1 , dostaneme

$$F_m = \mu_0 \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot R} L \quad \text{V 3.4.1.-2}$$

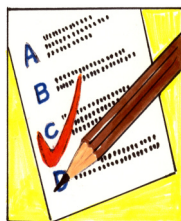
Zbývá nám určit směr síly F_m . Udělejte to.

?

Úlohu jsme řešili ve dvou krocích:

- 1) určili jsme indukci B_1 magnetického pole vodiče X
- 2) určili jsme sílu F_m , kterou působí pole o indukci B_1 na druhý vodič Y, kterým prochází proud I_2 .

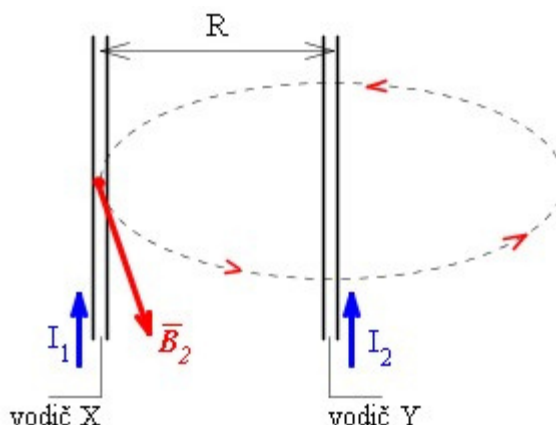
Stejný postup použijeme k výpočtu síly, kterou působí vodič Y na vodič X.



KO 3.4.1.-6. Kolem vodiče Y (O 3.4.1.-10a) s proudem I_2 je magnetické pole, jehož indukce B_2 má ve vzdálenosti R velikost $B_2 =$

?

O 3.4.1.-10a



KO 3.4.1.-7. Jaký je směr vektoru B_2 v bodě K na O 3.4.1.-10a?

?

KO 3.4.1.-8. Jak velkou silou F_m působí magnetické pole indukce B_2 na úsek vodiče X délky L . $F_m = \dots\dots$

?

KO 3.4.1.-9. Jaký je směr síly F_m , kterou působí vodič Y na vodič X?

?

Závěr:

Dva rovnoběžné vodiče se souhlasně orientovanými proudy se **přitahují**, vodiče s opačně orientovanými proudy se **odpuzují**.

Vodič X působí na vodič Y stejně velkou silou jako vodič Y na vodič X. Síly, kterými na sebe působí vodiče X a Y jsou stejně velké, opačně orientované. Jde o příklad akce a reakce.

KO 3.4.1.-10. Dosad'te do vztahu V 3.4.1.-2 následující hodnoty:

$$I_1 = I_2 = 1 \text{ A}, R = 1 \text{ m}, L = 1 \text{ m}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

Potom $F_m =$

?

Definice ampéru.

Ampér (A) je stálý proud, který při průchodu dvěma vodiči, které jsou

- rovnoběžné
- přímé
- nekonečně dlouhé
- zanedbatelného kruhového průřezu
- umístěné ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 m,

vyvolá mezi nimi stálou sílu o velikosti $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ na 1 metr délky.

KO 3.4.1.-11. Vycházejte z definice ampéru a určete jak velkou silou by se vodiče přitahovaly či odpuzovaly v případě, že jimi prochází stejný proud $I_1 = I_2 = 3 \text{ A}$. Kdy se budou přitahovat?

?

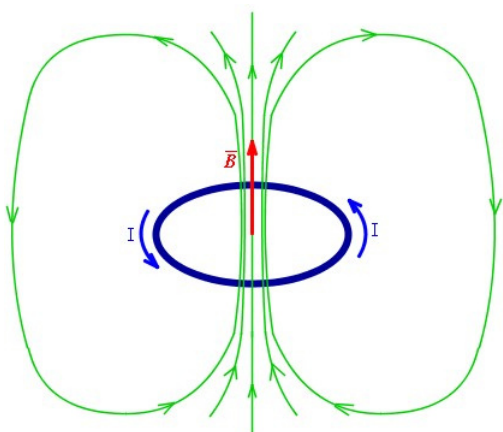


T 3.4.1.-5

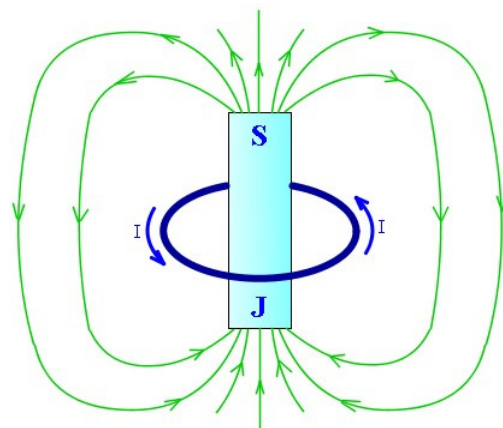
Magnetické pole vzniká kolem každého vodiče, kterým prochází proud a to bez ohledu na jeho tvar. Dosud jsme zkoumali dlouhý přímý vodič.

Jaké magnetické pole vytváří kruhová smyčka, kterou prochází proud I ?

Průběh magnetického pole vidíte na O 3.4.1.-11a.



O 3.4.1.-11a



O 3.4.1.-11b

Prívod a odvod proudu do závitu není nakreslen. Smyčka s proudem I vytváří magnetické pole velmi podobné poli krátkého tyčového magnetu (O 3.4.1.-11b). Orientaci indukčních čar (a tedy i indukce $\mathbf{B}$) určíme pravidlem pravé ruky :

- prsty pravé ruky směřují ve směru proudu,
- vztyčený palec určuje orientaci indukčních čar magnetického pole.

Ve středu kruhového závitu poloměru R , kterým prochází proud I je velikost magnetické indukce

$$B = \mu_o \frac{I}{2.R}$$

a směr vektoru $\mathbf{B}$ je kolmý na rovinu závitu.

T 3.4.1.-6

Jaké magnetické pole vytváří cívka, kterou prochází proud I ?

V kapitole 3.1. jsme viděli, že k vytvoření elektrického pole můžeme použít kondenzátor. Za základní typ kondenzátoru jsme považovali deskový kondenzátor. Podobně magnetické pole můžeme vytvořit **cívkou**. Nejjednodušším způsobem ji získáme tak, že navineme drát na kostru, jejíž průřez může být kruhový, čtvercový apod. Závity mají společnou podélnou osu a prochází jimi stejný proud ve stejném směru. Jde vlastně o N identických smyček, zapojených do série. V obvodech ji znázorňujeme způsobem, který vidíte na O 3.3.1.-12a.



O 3.3.1.-12a

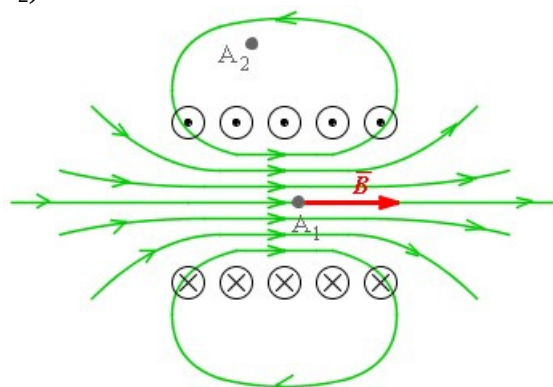
Můžete se setkat i s označením, které vidíte na O 3.3.2.-12b.



O 3.3.2.-12b

Jako základní typ budeme uvažovat dlouhou, hustě vinutou cívku (tj. těsně závit vedle závitu). Takovou cívku nazýváme **solenoid**. Budeme předpokládat, že délka solenoidu je mnohem větší než jeho průměr, takže můžeme zanedbat rušivý vliv začátku a konce vinutí. Na O 3.4.1.-13 vidíte indukční čáry magnetického pole reálného solenoidu konečné délky.

Pole je homogenní a silné uvnitř solenoidu (např. v bodě A_1), ale poměrně slabé vně solenoidu (např. v bodě A_2).



O 3.4.1.-13

Pro velikost indukce B uvnitř nekonečně dlouhého ideálního solenoidu můžeme odvodit vztah

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot n \quad \text{V 3.4.1.-3}$$

μ_0 je permeabilita vakua

I je proud, který prochází solenoidem

n je hustota závitů, tj. počet závitů na jednotku délky solenoidu.

Tento vztah platí dostatečně dobře i pro reálný solenoid, zajímá-li nás velikost magnetické indukce v bodech uvnitř solenoidu dostatečně daleko od jeho konců.

Je-li délka solenoidu l a celkový počet závitů N , potom hustota závitů

$$n = N/l$$

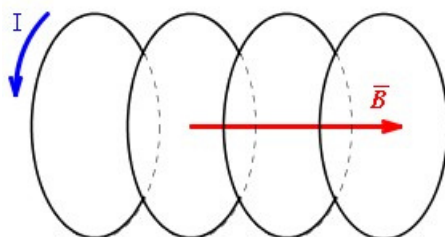
a vztah V 3.4.1.-3 můžeme zapsat takto:

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l} \quad \text{V 3.4.1.-4}$$

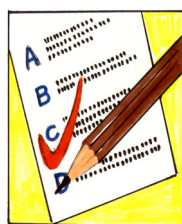
Orientace pole uvnitř solenoidu je určena pravidlem pravé ruky tak, že uchopíme solenoid do pravé ruky tak, že

- prsty směřují ve směru proudu I v závitech
- vztyčený palec ukazuje směr indukce B .

Ověřte si to na O 3.4.1.-13a.



O 3.4.1.-13a



KO 3.4.1.-12. Zvětšíte-li proud v cívce 2krát za jinak stejných podmínek), bude velikost indukce v dutině cívky

- stejná
- 2krát menší
- 2krát větší

?

KO 3.4.1.-13. Tři cívky mají stejnou délku

1. cívka má 100 závitů, kterými prochází proud 5 A.

2. cívka má 250 závitů, kterými prochází proud 2 A.

3. cívka má 500 závitů, kterými prochází proud 1 A.

U které cívky je velikost magnetické indukce v dutině cívky **nejmenší**?

a) u první

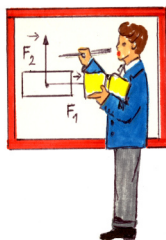
b) u druhé

c) u třetí

d) u všech je stejná

e) nedá se rozhodnout, protože neznáme délku cívek

?



RU 3.4.1.-3. Jaký poloměr R musí mít válcová cívka vinutá drátem o poloměru $r = 0,6 \text{ mm}$ závit vedle závitu, aby při proudu 2 A byl magnetický tok cívkou $3 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$?

Řešení: poloměr drátu $r = 0,6 \text{ mm} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $I = 2 \text{ A}$, $\Phi = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$

Indukční tok je definován podle V 3.3.2.-1 takto:

$$\Phi = B \cdot S \cos \alpha$$

V našem případě je

- **B velikost indukce v dutině cívky.**

Podle V 3.4.1.-4 je

$$B = \mu_0 \cdot N \cdot I / l$$

Počet závitů N a délku cívky l neznáme, ale víme, že cívka je vinuta závit vedle závitu vodičem o průměru $d = 2 \cdot r$

Na délku l tedy můžeme navinout $l / 2 \cdot r$ závitů a po dosazení dostaneme

$$B = \mu_0 \frac{\frac{l}{2 \cdot r} \cdot I}{l} = \mu_0 \frac{I}{2 \cdot r}$$

- **S velikost plochy závitů,**

tj. $S = \pi \cdot R^2$

- **α úhel, který svírá normála plochy závitů s vektorem indukce,**

tj. $\alpha = 0^\circ$

Pro velikost indukčního toku můžeme psát

$$\Phi = \mu_0 \frac{I}{2 \cdot r} \pi \cdot R^2 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{2 \cdot r \cdot \Phi}{\mu_0 \cdot I \cdot \pi}}$$

Dosadíme:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot \pi}} \Rightarrow R = 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Poloměr závitů je 2,13 cm.

T 3.4.1.-7

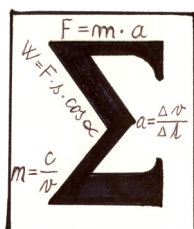
Jaký obecný závěr lze učinit na základě předchozího výkladu?

- Intenzita elektrického pole ve vodiči způsobí usměrněný pohyb nosičů náboje, vodičem prochází elektrický proud.
- Elektrický proud ve vodiči má za následek vznik magnetického pole.

A proto můžeme opakovat:

Elektrický proud a jeho magnetické pole existují vždy současně a jsou jen různými projevy elektromagnetického pole.

„Čisté“ elektrické pole můžeme studovat jen v případě statických nábojů (nábojů v klidu). V tomto případě hovoříme o elektrostatickém poli.



Pohybující se elektricky nabitě částice vytvářejí ve svém okolí magnetické pole. Elektrický proud a jeho magnetické pole existují vždy současně. Indukce **B** magnetického pole vodiče s proudem závisí na

- **proudu**, který vodičem prochází
- **tvaru** vodiče

- **poloze** zkoumaného bodu.

Magnetické pole přímého dlouhého vodiče lze charakterizovat takto:

Velikost magnetické indukce je

$$B = \mu_o \frac{I}{2\pi \cdot R} \quad \text{V 3.4.1.-1}$$

Indukční čáry jsou soustředné kružnice se středem ve vodiči. Jejich orientaci a tím taky **směr** indukce určíme pomocí pravidla pravé ruky.

Dva dlouhé rovnoběžné vodiče s proudem I_1 a I_2 působí na sebe vzájemnou silou

$$F_m = \mu_o \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot R} L \quad \text{V 3.4.1.-2}$$

Z tohoto vzájemného silového působení dvou vodičů, kterými prochází proud, definujeme jednotku proudu – ampér.

Magnetické pole cívky s proudem lze charakterizovat takto:

Velikost magnetické indukce v dutině dlouhé cívky je

$$B = \mu_o \frac{N \cdot I}{l} \quad \text{V 3.4.1.-4}$$

Magnetické pole uvnitř solenoidu můžeme považovat za homogenní,

směr indukce určíme pomocí pravidla pravé ruky.

Magnetické pole vně solenoidu je slabé.

3.4.2. Magnetické pole látek



- umět charakterizovat tři základní skupiny magnetických látek
- vědět co vyjadřuje relativní permeabilita
- vysvětlit, čeho dosáhneme vsunutím feromagnetického jádra do dutiny cívky s proudem

- vysvětlit magnetickou hysterezní smyčku
- vysvětlit co je elektromagnet



2 hodiny



Magnetické pole cívky.



T 3.4.2.-1

Prochází-li vinutím solenoidu o N závitů a o délce l proud I , je velikost magnetické indukce B_0 . Za předpokladu že uvnitř cívky je vakuum (přibližně vzduch), je velikost indukce dána vztahem V 3.4.1.-3 resp. V 3.4.1.-4

$$B_0 = \mu_0 \cdot I \cdot n \quad \text{nebo} \quad B_0 = \mu_0 \cdot N \cdot I / l \quad \text{V 3.4.2.-1}$$

permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

V následujícím výkladu budeme toto magnetické pole nazývat **vnější magnetické pole** a proud I jako **magnetizující proud**.

T 3.4.2.-2

Velikost magnetické indukce B_0 v dutině solenoidu můžeme měnit následujícím způsobem:

- Při pevném počtu závitů N a délce l budeme měnit proud I .

Roste-li proud I v cívce - velikost indukce B_0 v dutině poroste.

Klesá-li proud I v cívce - velikost indukce B_0 v dutině klesá.

- Existuje však ještě další možnost : **vložíme do dutiny solenoidu jádro** z nějaké látky.

Velikost indukce B_0 vnějšího magnetického pole se změní.

Jestliže ve vakuu vytváří proud I magnetické pole o magnetické indukci B_0 , pak stejný proud v homogenním, izotropním látkovém prostředí vytváří magnetické pole o magnetické indukci B , která je menší, mírně větší nebo hodně větší než B_0 .

$$B = \mu_r \cdot B_0 \quad \text{V 3.4.2.-2}$$

kde μ_r je relativní permeabilita. Je to bezrozměrné číslo, pro vakuum (a přibližně pro vzduch) je rovno jedné.

Látky, pro které je

$\mu_r < 1$ jsou **diamagnetické** (např. inertní plyny, zlato, rtuť, měď má $\mu_r = 0,999\,990$),
 $B < B_0$

$\mu_r > 1$ jsou **paramagnetické** (např. sodík, draslík, hliník má $\mu_r = 1,000\,023$),
 $B > B_0$
 $\mu_r \gg 1$ jsou **feromagnetické** (např. železo, kobalt, nikl, ocel má $\mu_r = 8\,000$),
 $B \gg B_0$

T 3.4.2.-3

A na scéně jsou opět elektrony!

V minulé kapitole jsme poznali jeden způsob, jakým mohou elektrony generovat vznik magnetického pole. Elektrický proud ve vodiči vytváří kolem vodiče magnetického pole.

Díky hlavně elektronům existuje i další způsob, který umožňuje vznik magnetického pole. K výkladu vzniku magnetického pole látek je nezbytná znalost kvantové fyziky. Proto uvedeme pouze některé nezbytné závěry, ke kterým kvantová fyzika dospěla.

1. Každý elektron v atomu vytváří elementární magnetické pole, která se skládají a vytvářejí výsledné magnetické pole atomu. Takto získaná výslednice pro jeden atom se skládá s výslednicemi všech ostatních atomů ve vzorku látky. Magnetickou indukci tohoto výsledného pole označme B' . Tento fakt podmiňuje vznik **paramagnetizmu a feromagnetizmu**.

Jádro atomu má také svá elementární magnetická pole. Jsou ale ve srovnání s polem elektronů mnohem menší a nebudeme se jimi zabývat.

2. Umístíme-li jakoukoliv látku do vnějšího magnetického pole, vzniká (indukuje se) v jejích atomech slabé magnetické pole indukce B_i , orientované proti vnějšímu magnetickému poli. Tento fakt podmiňuje vznik **diamagnetizmu**.

Toto indukované magnetické pole zmizí, jestliže vnější magnetické pole odstraníme. Tento **diamagnetizmus vykazují všechny látky. Může být ale překryt, pokud látka vykazuje také paramagnetizmus nebo feromagnetizmus**.

T 3.4.2.-4

Diamagnetické látky

jsou takové látky, u kterých se (v důsledku uspořádání elektronů v atomu) magnetická pole uvnitř atomu navzájem zcela ruší, tedy $B' = 0$. Umístíme-li diamagnetickou látku do vnějšího magnetického pole indukce B_0 vzniká v látce pouze magnetické pole indukce B_i a dojde k mírnému zeslabení vnějšího pole. Pro výslednou indukci B bude platit:

$B = B_0 - B_i$, tedy $B < B_0$ a tedy $\mu_r < 1$.

Je-li diamagnetická látka umístěná do vnějšího magnetického pole, způsobí **mírné zeslabení** indukce vnějšího magnetického pole.

T 3.4.2.-5

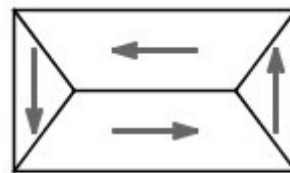
Paramagnetické látky

jsou takové látky, jejichž atomy mají svá elementární magnetická pole. Vektory těchto polí jsou však v látce náhodně orientovány, takže látka jako celek nemá výsledné magnetické pole. Jestliže vložíme paramagnetickou látku do vnějšího magnetického pole indukce B_0 může dojít k částečnému uspořádání vektorů elementárních magnetických polí atomů a to ve směru B_0 vnějšího pole. Tím se v látce vytvoří magnetické pole indukce B' , jejíž směr je totožný s indukcí B_0 . Toto magnetické pole **zmizí** jestliže vnější magnetické pole odstraníme. Umístíme-li paramagnetickou látku do vnějšího magnetického pole indukce B_0 dojde k **mírnému zesílení** vnějšího pole. Pro výslednou velikost indukce B bude platit: $B > B_0$ a tedy $\mu_r > 1$.

T 3.4.2.-6

Feromagnetické látky

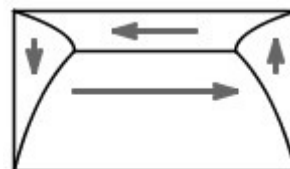
mají rovněž paramagnetické atomy, avšak vlivem tzv. výměnných sil mezi sousedními atomy nastává i bez vnějšího magnetického pole souhlasné uspořádání vektorů magnetických polí atomů v malé oblasti látky. V látce vznikají zmagnetované mikroskopické oblasti ($10^{-3} \text{ mm}^3 - 10 \text{ mm}^3$) zvané **magnetické domény**. Jednotlivé domény jsou však orientovány nahodile (viz. O 3.4.2.-1a), takže pole domén se navzájem navenek z velké části ruší a látka jako celek nemá výsledné magnetické pole. Proto např. kus železa není sám od sebe magnetem dokud ho nevložíme do vnějšího magnetického pole.



$$\vec{B}_0 = 0$$

O 3.4.2.-1a

Jestliže vložíme feromagnetickou látku do vnějšího magnetického pole o indukci B_0 , magnetické domény se orientují souhlasně. Při tomto ději se objem domén postupně zvětšuje (O 3.4.2.-1b), až při jejich souhlasném uspořádání doménová struktura vymizí.



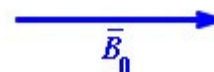
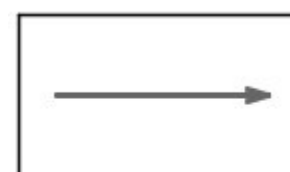
O 3.4.2.-1b



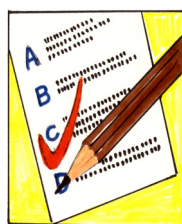
Říkáme, že látka je **magneticky nasycena** (O 3.4.2.-1c). Onen kus železa se stal magnetem. Umístíme-li feromagnetickou látku do vnějšího magnetického pole indukce B_0 dojde k **značnému zesílení** vnějšího pole. Pro výslednou indukci bude platit: $B \gg B_0$ a tedy $\mu_r \gg 1$. Magnetické pole feromagnetické látky **částečně zůstává**, i když vnější magnetické pole odstraníme.

Zmíněný kus železa se stal trvale magnetem. Pro každou feromagnetickou látku existuje teplota, tzv. Curieova teplota, při jejímž překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou. Např. železo má Curieovu teplotu 770°C .

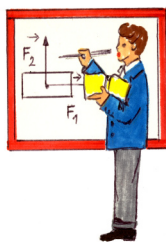
Mezi feromagnetické látky patří např. železo, kobalt, nikl. Mezi feromagnetické látky patří také ferity. Jsou to sloučeniny oxidu železa s oxidy jiných kovů (např. Mn, Ba). Mají relativní permeabilitu 10^2 až 10^3 a velký elektrický odpor. Používají se pro výrobu permanentních magnetů nebo jako jader cívek ve vysokofrekvenčních obvodech.



O 3.4.2.-1c



KO 3.4.2.-1. Magnetická indukce cívky se vzduchovým jádrem je 0,002 T. Zasuneme-li do cívky s nezměněným proudem jádro, vzroste indukce uvnitř cívky na 1 T. Jaká je relativní permeabilita jádra? $\mu_r =$?



RU 3.4.2.-1. Dlouhým solenoidem, který má navinuto 80 závitů na centimetr prochází proud 70 mA. Vypočítejte velikost magnetické indukce v dutině cívky

a) se vzduchovým jádrem

b) s feromagnetickým jádrem, jehož $\mu_r = 650$.

Řešení: $n = 80 \text{ cm}^{-1} = 8000 \text{ m}^{-1}$, $I = 70 \text{ mA} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ A}$

Podle V 3.4.2.-1 je velikost indukce solenoidu s vakuovým jádrem

$$B_0 = \mu_0 \cdot I \cdot n$$

a pro solenoid s jádrem, jehož permeabilita je μ_r platí V 3.4.2.-2

$$B = \mu_r \cdot B_0 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot n$$

a) Pro vzduch je přibližně $\mu_r = 1$ a tedy po dosazení

$$B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 7 \cdot 10^{-2} = 7,04 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

b) Pro dané feromagnetické jádro je $\mu_r = 650$ a tedy velikost indukce je

$$B = 650 \cdot 7,04 \cdot 10^{-4} = 4,6 \cdot 10^{-1} \text{ T}$$

Velikost indukce solenoidu s feromagnetickým jádrem bude při magnetizujícím proudu 70 mA 650krát větší než s vakuovým jádrem.

V této souvislosti je třeba zmínit velmi důležitou věc. Relativní permeabilita μ_r feromagnetických látek **není** pro danou látku **konstantní**, nýbrž závisí na magnetizujícím proudu I (při konstantní hustotě závitů $n = N/l$).



T 3.4.2.-7

Co je permanentní magnetizmus?

Magnetické pole feromagnetické látky částečně zůstává i když vnější magnetické pole odstraníme. Všimněme si tohoto jevu poněkud podrobněji.

Pokud N závitů solenoidu s vakuovým jádrem prochází proud I , v dutině cívky vznikne magnetické pole o indukci B_0 (indukce vnějšího magnetického pole).

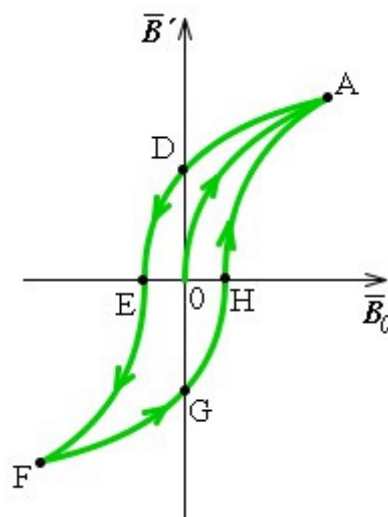
Podle V 3.4.2.-1 platí

$$B_0 = \mu_0 \cdot N \cdot I / l$$

Do dutiny cívky nyní vložíme feromagnetické jádro. Předpokládejme, že jádro bylo před zavedením proudu do vinutí cívky úplně nemagnetické.

A nyní sledujte obrázek O 3.4.2.-2. Znázorňuje závislost B' (velikosti indukce pole jádra) na B_0 (velikosti indukce vnějšího pole).

- Začneme v bodě O a zvyšujeme proud I v cívce, až B_0 má hodnotu odpovídající bodu A (stav nasycení). Proces uspořádávání domén do směru B_0 je ukončen. Další růst proudu již nezpůsobí růst magnetického pole jádra.
- Snižujeme proud ve vinutí cívky, indukce B_0 klesá zpět k nule (bod D). V bodě D neprochází cívkou magnetizující proud a tedy $B_0 = 0 \text{ T}$. Vnější magnetické pole bylo odstraněno, ale indukce pole jádra má velikost B'_{OD} .
- Obrátíme směr proudu a zvyšujeme jeho velikost,



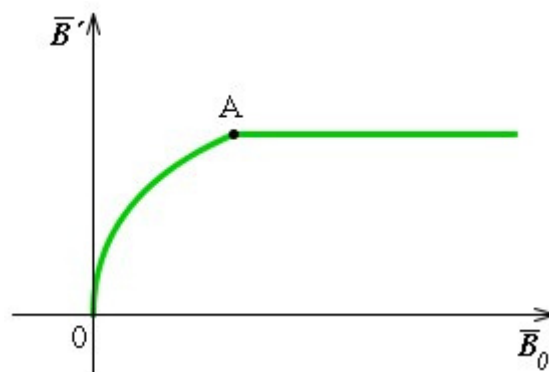
O 3.4.2.-2

- až velikost B_0 má hodnotu odpovídající bodu F.
- Proud opět snižujeme až na nulu (do bodu G).
- Změníme směr proudu na původní, až znovu dosáhneme bodu A.

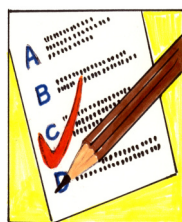
Křivka ADFGA se nazývá **magnetická hysterezní smyčka**.

Závěr:

- Indukce B' magnetického pole jádra závisí nejen na indukci B_0 vnějšího pole, ale i na tom, jakou cestou k magnetizaci došlo. Po zmagnetování jádra (křivka OA) a po odstranění vnějšího magnetického pole (magnetizující proud $I = 0$ A, $B_0 = 0$ T v bodě D a G) vykazuje jádro magnetické pole o indukci velikosti $B' = B'_{OD} = B'_{OG}$. Této magnetické indukci se říká **remanentní (zbytková) magnetická indukce** popsaný jev se nazývá **hystereze**. Materiály, které mají malou remanentní magnetickou indukci jsou **magneticky měkké**. **Magneticky tvrdé** materiály mají naopak remanentní magnetickou indukci velkou. Tyto magneticky tvrdé materiály se chovají jako **permanentní magnety** (např. uhlíková ocel).
- Remanentní magnetickou indukci lze zrušit tak, že do cívky zavedeme proud opačného směru.
- Křivka OA se nazývá **křivka prvotní magnetizace**. Relativní permeabilita μ_r není konstantní a proto závislost B' na B_0 po dobu magnetizace (OA) je nelineární. Pokud bychom zvětšovali magnetizující proud v cívce (B_0 roste) i po dosažení stavu magnetického nasycení jádra (tj. v bodě A), indukce jádra B' se již nebude zvětšovat, jak vidíte na O 3.4.2.-3.



O 3.4.2.-3



KO 3.4.2.-2. Sledujte O 3.4.2.-2. Ve kterých bodech hysterezní smyčky prochází cívku největší magnetizující proud? Jak bude reagovat jádro na další růst proudu v cívce?

?

KO 3.4.2.-3. Sledujte O 3.4.2.-2. Ve kterých bodech dosáhla velikost indukce B' magnetického pole jádra maximální hodnotu?

?

KO 3.4.2.-4. Sledujte O 3.4.2.-2. Ve kterých bodech dosáhlo jádro stav nasycení?

?

KO 3.4.2.-5. Sledujte O 3.4.2.-2. Uvažujte jádro ve dvou stavech A a F. V čem se tyto stavy liší?

?

KO 3.4.2.-6. Sledujte O 3.4.2.-2. Ve kterých bodech měníte směr magnetizujícího proudu?

?

KO 3.4.2.-7. Sledujte O 3.4.2.-2. Ve kterých bodech se mění směr indukce B' magnetického pole jádra?

?

KO 3.4.2.-8. Sledujte O 3.4.2.-2. Ve kterých bodech je magnetizující proud v cívce roven nule?

?

KO 3.4.2.-9. Sledujte O 3.4.2.-2. Ve kterých bodech je jádro nemagnetické?

?

KO 3.4.2.-10. Na výrobu trvalých magnetů používáme

- a) tvrdé magnetické materiály
- b) měkké magnetické materiály

?



T 3.4.2.-8

Již v úvodu studia magnetismu jsme hovořili o tom, že první magnetické jevy byly pozorovány u magnetovce.

Jak přírodní magnetovec přišel ke svým vlastnostem permanentního magnetu?

Hysterezi můžeme vysvětlit pomocí magnetických domén. Jestliže vnější magnetické pole B_0 zesílíme a potom zeslabíme na původní hodnotu, nevrátí se domény zcela do původního stavu, ale částečně si zapamatují směr, do něhož byly natočeny předchozí změnou. Paměti magnetických materiálů využíváme při uchovávání informací na magnetických páskách kazet nebo na discích počítačů.

A nyní odpověď na úvodní otázku.

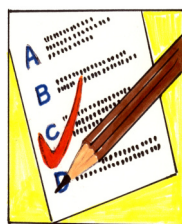
Paměť daná seřazením domén se může vyskytnout i v přírodě. Při atmosférických výbojích (bouřka) představuje blesk velmi silné proudy, které procházejí do země. Silné magnetické pole těchto proudů mohou zmagnetovat feromagnetický materiál v blízké skále. Takový materiál zachovává v důsledku hystereze jistou magnetizaci i po úderu blesku, tj. poté, co proud zmizí.

Např. zvětralý čedič je magnetický.

T 3.4.2.-9

Dokázali byste vysvětlit co je elektromagnet?

Je to v podstatě cívka navinutá na feromagnetickém jádře. Jeho magnetické pole má mnohem větší magnetickou indukci než magnetické pole téže cívky s vakuovým jádrem.



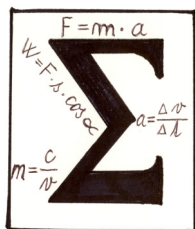
KO 3.4.2.-11. Na výrobu jader pro elektromagnety používáme

- a) tvrdé magnetické materiály
- b) měkké magnetické materiály

?

KO 3.4.2.-12. Jak je možno zhotovit elektromagnet s plynule měnitelnou nosnou silou?
?

KO 3.4.2.-13. Někdy při přepravě kovového šrotu jeřábem s elektromagnetem neodpadne po vypnutí proudu všechnen šrot. Jak jej lze uvolnit?
?



Magnetické pole látky má původ v magnetických vlastnostech atomů. Elementární částice s nábojem, ze kterých se skládá atom (zejména elektrony), mají kolem sebe magnetické pole. Tato magnetická pole se skládají tak, že

- vytvářejí navenek výrazné magnetické pole (feromagnetické látky)
- se vyruší a žádné výraznější magnetické pole jako výsledek nevznikne (paramagnetické a

diamagnetické látky).

Velikost magnetické indukce B_0 uvnitř solenoidu můžeme ovlivnit vložením jádra do jeho dutiny.

Výsledná velikost indukce v dutině solenoidu bude

$$B = \mu_r \cdot B_0 \quad \text{V 3.4.2.-2}$$

kde μ_r je **relativní permeabilita**. Je to bezrozměrné číslo, pro vakuum (a přibližně pro vzduch) je rovno jedné.

Látky, pro které je

$\mu_r < 1$ jsou **diamagnetické** $B < B_0$

$\mu_r > 1$ jsou **paramagnetické** $B > B_0$

$\mu_r \gg 1$ jsou **feromagnetické** $B \gg B_0$

Diamagnetická látka umístěná do vnějšího magnetického pole způsobí mírné zeslabení indukce tohoto vnějšího magnetického pole.

Paramagnetická látka umístěná do vnějšího magnetického pole způsobí mírné zesílení indukce tohoto vnějšího magnetického pole.

Feromagnetická látka (charakterizována doménovou strukturou) umístěná do vnějšího magnetického pole způsobí značné zesílení indukce tohoto vnějšího magnetického pole.

Diamagnetismus a paramagnetismus zmizí jestliže vnější pole odstraníme. Magnetické pole feromagnetické látky částečně zůstává, i když vnější magnetické pole odstraníme. Tento jev se nazývá **hystereze**. Velikost **remanentní magnetické indukce** je důležitá pro posuzování magneticky tvrdých a měkkých materiálů. Přesáhne-li teplota feromagnetického vzorku jeho Curieovu teplotu, vorek vykazuje pouze paramagnetismus.

3.5. Elektromagnetická indukce

T 3.5.0.-1

V předchozí kapitole 3.4. jsme hovořili o tom, že magnetické jevy jsou úzce spjaty s elektrickými jevy (magnetické pole vzniká v okolí pohybujících se částic s nábojem). K vysvětlení vztahu elektrického a magnetického pole přispěl významnou měrou M. Faraday. Roku 1831 formuloval princip elektromagnetické indukce: elektrické pole může vznikat jako důsledek změny pole magnetického.

3.5.1. Faradayův zákon elektromagnetické indukce.



- popsat způsoby vzniku indukovaného elektromotorického napětí
- vysvětlit příčinu vzniku indukovaného napětí
- umět formulovat Faradayův zákon elektromagnetické indukce
- vědět, jaký směr má indukovaný proud
- umět aplikovat Lenzův zákon na konkrétních příkladech
- umět vysvětlit indukční jevy v plošných a prostorových vodičích (vířivé proudy)



2 hodiny

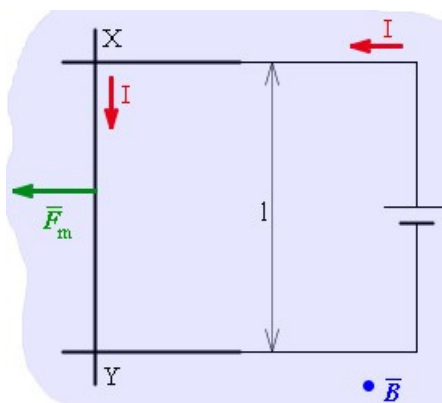


Síla F_m kterou magnetické pole působí na vodič s proudem. Indukční tok Φ_m . Magnetické pole kruhového závitu a cívky. Ohmův zákon.



T 3.5.1.-1

Zopakujme si řešenou úlohu RU 3.3.4.-1. Kovový vodič XY může klouzat po dvou vodorovných kolejnicích, které jsou ve vzdálenosti l (O 3.5.1.-1a). Předpokládáme, že je to jediná část obvodu, která se může pohybovat. Celá soustava je v homogenním magnetickém poli indukce B . Její směr je kolmý na rovinu obrázku a míří na vás. Pokud obvodem prochází proud I , na vodič XY působí magnetické pole silou F_m a vodič se začne pohybovat ve směru působící síly.



O 3.5.1.-1a

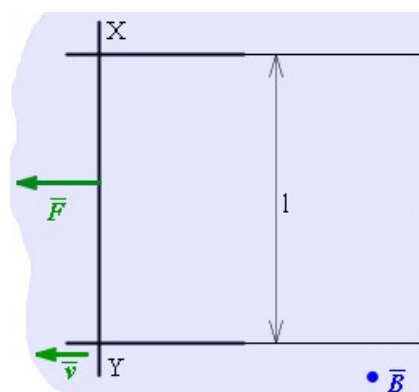
A nyní změníme experiment takto:

- odpojíte zdroj (O 3.5.1.-1b)
- vodič XY budete posouvat po kolejnicích vy

Otázka - objeví se v obvodu proud ?

Odpověď – ANO

Proud vznikající v obvodu (smyčce) tímto způsobem se nazývá **indukovaný proud**, práce připadající na jednotkový náboj při vzniku tohoto proudu je **indukované elektromotorické napětí** U_i a tento proces vzniku indukovaného proudu se nazývá **elektromagnetická indukce**.



O 3.5.1.-1b

Závěr z obou právě popsaných experimentů můžeme formulovat takto:

Obr. O 3.5.1.-1a dodáváme elektrickou energii (obvodem prochází proud I)	Obr. O 3.5.1.-1b dodáváme mechanickou energii
do soustavy v magnetickém poli	do soustavy v magnetickém poli
→ získáme mechanickou energii	→ získáme elektrickou energii (obvodem prochází indukovaný proud)
Na tomto principu pracuje elektrický motor	Na tomto principu pracuje elektrický generátor

T 4.3.1.-2

Co je podmínkou pro vznik indukovaného proudu?

Vraťme se k O 3.5.1.-1b. Táhneme-li vodič XY doleva $\leftarrow$ (nebo doprava $\rightarrow$) mění se velikost magnetického indukčního toku Φ_m plochou vymezenou obvodem (smyčkou).

Budete-li vodič XY posouvat směrem doleva, bude se zvětšovat plocha vymezená vodivou smyčkou a tedy i indukční tok, který touto plochou prochází (podle V 3.3.2.-1 je $\Phi_m = B \cdot S$, $\alpha = 0^\circ$).

Budete-li vodič XY posouvat směrem doprava, bude se zmenšovat plocha vymezená smyčkou a tedy i indukční tok plochou smyčky.

Zákon elektromagnetické indukce formuloval Faraday takto:

Ve smyčce se indukuje elektromotorické napětí U_i , když se mění indukční tok procházející plochou smyčky.

Velikost indukovaného elektromotorického napětí ve vodivé smyčce je rovna rychlosti změny magnetického indukčního toku procházejícího touto smyčkou.

Pro indukované elektromotorické napětí platí:

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.1.-1}$$

Faradayův zákon elektromagnetické indukce zapsaný v tomto tvaru platí pro **všechny procesy**, při nichž dochází ke vzniku indukovaného elektromotorického napětí za

předpokladu, že

- indukční tok se mění rovnoměrně, nebo
- počítáme střední hodnotu U_i .

T 3.5.1.-3

Diskuse vztahu V 3.5.1.-1

- Jaké „**všechny procesy**“ máme na mysli?

Podle V 3.3.2.-1 je magnetický indukční tok

$$\Phi_m = B \cdot S \cos \alpha$$

Magnetický indukční tok smyčkou můžeme měnit různě:

- 1) měníme velikost indukce B magnetického pole, v němž se smyčka nachází,
- 2) měníme velikost S plochy smyčky, kterou prochází indukční tok,
- 3) měníme úhel, který svírá indukce B s normálou plochy smyčky.

- Víte co znamená „**rovnoměrná změna indukčního toku**“?

Znamená to, že rychlost s jakou se indukční tok mění (tj. roste nebo klesá) je konstantní.

Bude to v případě, že **závislost indukčního toku na čase je lineární**, tj. $\Phi_m = k \cdot t$, kde k je konstanta úměrnosti. Grafem závislosti toku Φ_m na čase je přímka.

Jinými slovy to znamená, že za každou sekundu se indukční tok změní o tutéž hodnotu.

Pokud se indukční tok mění nerovnoměrně, okamžitá hodnota indukovaného napětí je určena derivací indukčního toku podle času a vztah V 3.5.1.-1 píšeme ve tvaru

$$U_i = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad \text{V 3.5.1.-1a}$$

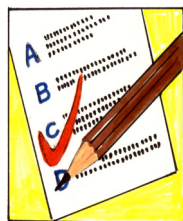
- Co znamená **znaménko mínus** ve vztahu V 3.5.1.-1?

Indukované elektromotorické napětí U_i vyvolává v obvodu indukovaný proud, jehož magnetické pole **vždy brání změně indukčního toku**. Budeme o tom hovořit později. Pokud nás zajímá pouze velikost indukovaného napětí, není znaménko mínus podstatné.

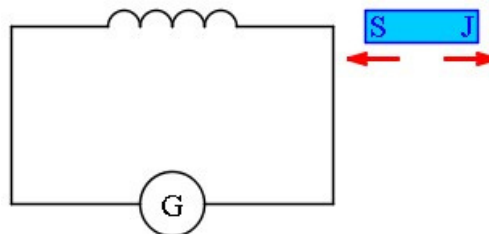
- Jak se změní vztah V 3.5.1.-1 budeme-li jej **aplikovat na cívku**?

Jestliže měníme indukční tok procházející cívkou o N závitů, pak indukované napětí vzniká v každém závitě. Je-li cívka vinuta těsně, je tok každým závitěm stejný a indukované napětí na celém vinutí je

$$U_i = -N \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.1.-2}$$



KO 3.5.1.-1. Na O 3.5.1.-2 vidíte uzavřený vodivý obvod, který se skládá z cívky a přístroje indikujícího elektrický proud (galvanometr). Přiblížíme-li k cívce jeden pól magnetu, galvanometr



O 3.5.1.-2

- a) bude ukazovat výchylku
 - b) nebude ukazovat výchylku
- ?

KO 3.5.1.-2. Indukční tok se mění v závislosti na čase takto:

- a) $\Phi_m = 3 \cdot t$
- b) $\Phi_m = 2 \cdot t^2$

- c) $\Phi_m = t/2$
 d) $\Phi_m = \ln t$
 e) $\Phi_m = 2 \cos 2\pi \cdot t$

Ve kterém případě je změna indukčního toku rovnoměrná?

?

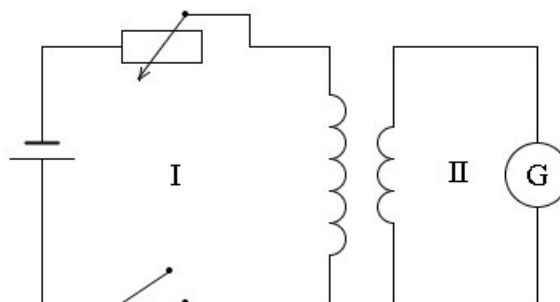
KO 3.5.1.-3. Indukční tok se mění v závislosti na čase takto: $\Phi_m = 2 \cdot t$ (Wb,s). Napište s jakou rychlostí se indukční tok mění. $\Delta\Phi_m/\Delta t =$ Wb/s

?

KO 3.5.1.-4. Sledujte O 3.5.1.-3. Klíč je sepnut, primárním obvodem prochází konstantní proud. Galvanometr v sekundárním obvodu

- a) bude ukazovat výchylku
 b) nebude ukazovat výchylku

?



O 3.5.1.-3

KO 3.5.1.-5. Sledujte O 3.5.1.-3. Klíčem v primárním obvodu přerušujeme proud. Galvanometr v sekundárním obvodu

- a) bude ukazovat výchylku
 b) nebude ukazovat výchylku

?

KO 3.5.1.-6. Sledujte O 3.5.1.-3. V primárním obvodu zvětšujeme (respektive zmenšujeme) odpor a tím zmenšujeme (respektive zvětšujeme) proud. Galvanometr v sekundárním obvodu

- a) bude ukazovat výchylku
 b) nebude ukazovat výchylku

?

KO 3.5.1.-7. Sledujte O 3.5.1.-3. Primárním obvodem prochází konstantní proud. Měníme vzájemnou polohu cívek. Galvanometr v sekundárním obvodu

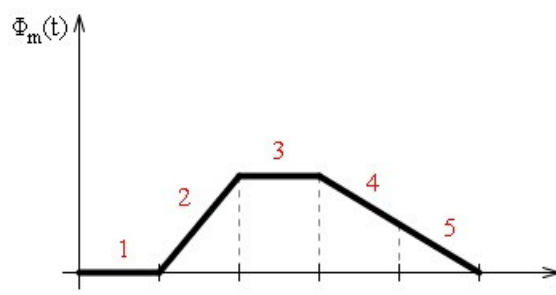
- a) bude ukazovat výchylku
 b) nebude ukazovat výchylku

?

KO 3.5.1.-8. Na obrázku O 3.5.1.-4 vidíte graf závislosti indukčního toku rovinným závitem na čase. Ve kterých úsecích grafu se v závitu nebude indukovat napětí?

- a) 1
 b) 2
 c) 3
 d) 4
 e) 5

?



O 3.5.1.-4

KO 3.5.1.-9. Na O 3.5.1.-4 vidíte graf závislosti indukčního toku rovinným závitem na

čase. Ve kterých úsecích grafu se v závitu indukuje největší napětí?

- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 4
- e) 5
- ?

KO 3.5.1.-10. Na O 3.5.1.-4 vidíte graf závislosti indukčního toku rovinným závitem na čase. Ve kterých úsecích grafu se v závitu indukuje nejmenší napětí různé od nuly?

- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 4
- e) 5
- ?



T 3.5.1.-4. Na obrázku O 3.5.1.-3 je ke zdroji o stálém elektromotorickém napětí připojena přes reostat R a spínač cívka. Obvod I se nazývá primární, a rovněž cívka se označuje jako cívka primární. Cívka v obvodu II, připojená ke galvanometru G , tvoří obvod sekundární, v němž se indukuje elektrický proud. Tato cívka se nazývá cívka sekundární.

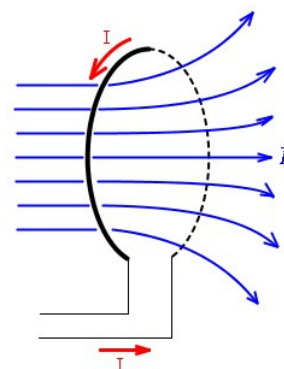
T 3.5.1.-5

Lenzovo pravidlo k určování směru indukovaného proudu ve smyčce.

Dříve než vyslovíme Lenzovo pravidlo zopakujme si pravidlo pravé ruky pro

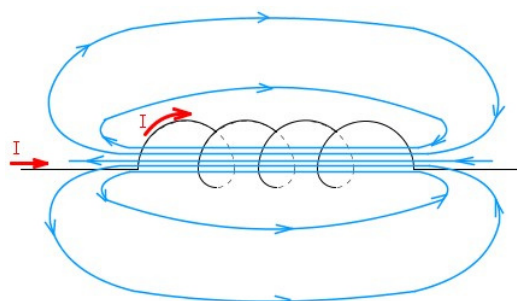
- magnetické pole **kruhového závitu** s proudem I (O 3.5.1.-5), tj. prsty pravé ruky ve směru proudu, vztyčený palec ukazuje orientaci indukčních čar (indukce $\mathbf{B}$) uvnitř závitu.

- magnetické pole **cívky** s proudem I (O 3.5.1.-6), tj. prsty pravé ruky ve směru proudu, vztyčený palec ukazuje orientaci indukčních čar (indukce $\mathbf{B}$) v dutině cívky.



O 3.5.1.-5

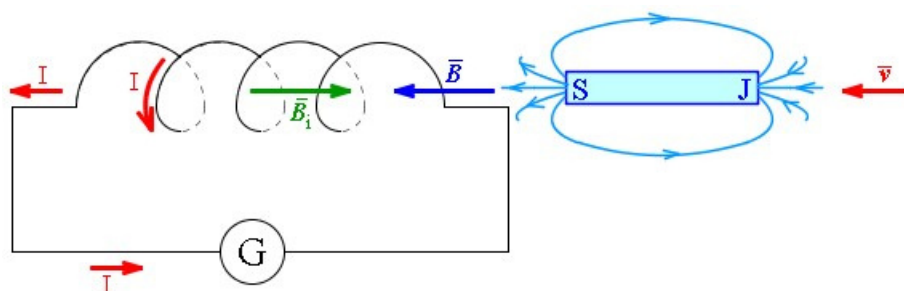
O 3.5.1.-6



A nyní k Lenzovu pravidlu, které zní:

Indukovaný proud v uzavřeném vodivém obvodu má vždy takový směr, že magnetické pole

tohoto indukovaného proudu působí **proti změně**, která ho vyvolala.



O 3.5.1.-7

Vraťme se k experimentu, který je popsán v KO 3.5.1.-1. a sledujte obrázek O 3.5.1.-7.

K cívice **přibližujeme** magnet rychlostí v :

- indukční tok závitů cívky roste (plochu závitů protíná více siločar),
- vektor $\mathbf{B}$ má směr doleva,
- v cívice se indukuje proud. Tento indukovaný proud má za následek vznik magnetického pole cívky indukce $\mathbf{B}_i$. A právě toto magnetické pole podle Lenze brání změně, která ho vyvolala.

Jaká změna v našem případě vyvolala vznik $\mathbf{B}_i$? Byl to **růst** indukčního toku, tedy $\mathbf{B}_i$ bude mít **směr opačný** než $\mathbf{B}$.

Směr indukovaného proudu určíte pravidlem pravé ruky, začněte ale palcem:

- palec pravé ruky ve směru $\mathbf{B}_i$
- zahnuté prsty vám určí směr indukovaného proudu v cívice.

Zopakujte si celý postup ještě jednou podle O 3.5.1.-8.

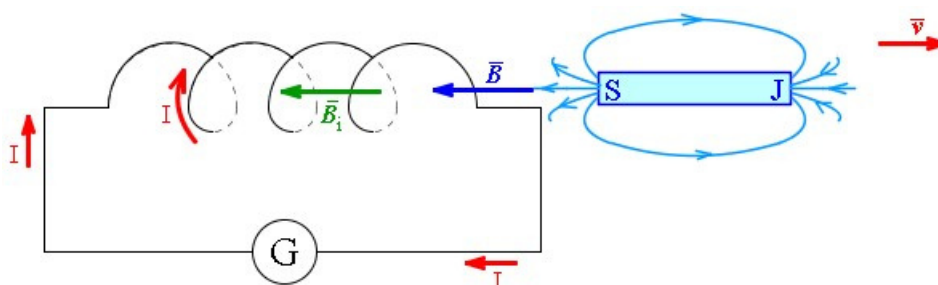
Magnet nyní **vzdalujeme** od cívky rychlostí v :

- indukční tok závitů cívky klesá,
- vektor $\mathbf{B}$ má směr doleva,
- v cívice se indukuje proud. Tento indukovaný proud má za následek vznik magnetického pole o indukce $\mathbf{B}_i$.

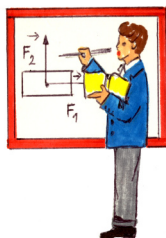
Jaká změna v našem případě vyvolala vznik $\mathbf{B}_i$? Byl to **pokles** indukčního toku závitů cívky a tedy $\mathbf{B}_i$ bude mít **směr souhlasný** s indukcí $\mathbf{B}$.

Směr indukovaného proudu určíte pravidlem pravé ruky, začněte ale palcem

- palec pravé ruky ve směru $\mathbf{B}_i$
- zahnuté prsty vám určí směr indukovaného proudu v cívice.



O 3.5.1.-8



RU 3.5.1.-1. Kovový vodič XY může klouzat po dvou vodorovných

kolejnicích, které jsou ve vzdálenosti l (viz. O 3.5.1.-1b). Celá soustava je v homogenním magnetickém poli o indukci $\mathbf{B}$. Její směr je kolmý na rovinu obrázku a míří na vás. Vodič XY budete posouvat směrem doleva konstantní rychlostí v .

a) Určete indukované napětí U_i .

b) Určete velikost a směr indukovaného proudu.

Řešení:

a) Budete-li vodič XY posouvat směrem doleva, bude se zvětšovat plocha vymezená vodivou smyčkou a tedy i indukční tok touto plochou (O 3.5.1.-1c). Tato změna indukčního toku má za následek vznik indukovaného elektromotorického napětí a v důsledku toho i proudu v obvodu.

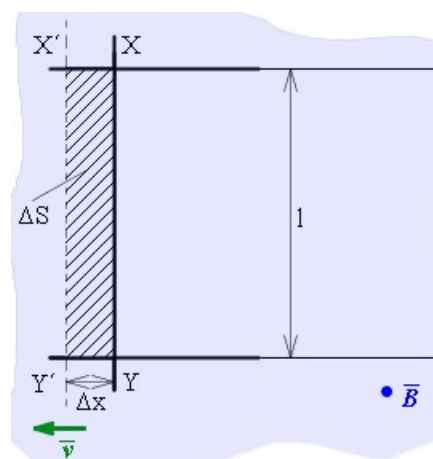
Podle V 3.5.1.-1 je velikost indukovaného napětí

$$U_i = -\Delta\Phi_m / \Delta t$$

Protože nás zajímá jen velikost indukovaného napětí, znaménka mínus si dále nebudeme všimát.

Podle V 3.3.2.-1 je magnetický indukční tok

$$\Phi_m = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$



O 3.5.1.-1c

V našem případě vektor indukce $\mathbf{B}$ svírá s vektorem normály plochy S úhel $\alpha = 0^\circ$,

$$\cos 0^\circ = 1 \quad \text{a} \quad \Phi_m = B \cdot S.$$

Pro indukované napětí bude platit

$$U_i = \Delta(B \cdot S) / \Delta t \quad (a)$$

Podle zadání je celá soustava v homogenním magnetickém poli ($B = \text{konst.}$)

a rovnici (a) můžeme psát ve tvaru

$$U_i = B \cdot \Delta S / \Delta t \quad (b)$$

Předpokládejme, že v určitém okamžiku je pohyblivý vodič v poloze XY. Za čas Δt jej posunete po dráze Δx do polohy X'Y'. Pokud vodič koná rovnoměrný pohyb, pro jeho rychlost bude platit

$$v = \Delta x / \Delta t$$

Plocha, kterou protíná indukční tok se zvětší o ΔS

$$\Delta S = \Delta x \cdot l = v \cdot \Delta t \cdot l \quad (c)$$

Dosadíme-li rovnici (c) do rovnice (b) dostaneme velikost indukovaného napětí

$$U_i = B \cdot v \cdot l$$

b) Obvodem bude procházet indukovaný proud.

Velikost indukovaného proudu je $I = U_i / R$,

$$\text{tedy} \quad I = B \cdot v \cdot l / R$$

kde R je celkový odpor obvodu.

Jeho **směr** určíme podle Lenzova pravidla takto: při posouvání vodiče XY doleva

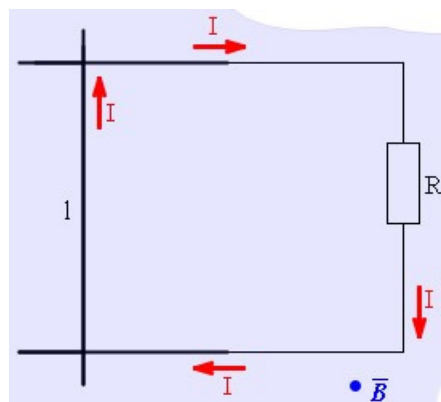
- dochází ke **zvětšování indukčního toku**, který protíná plochu vymezenou tímto vodivým uzavřeným obvodem.

- indukce $\mathbf{B}$ má směr na vás,

- indukovaný proud má za následek vznik magnetického pole indukce B_i , které jak víme „je zásadně v opozici“, tj. v našem případě působí proti růstu indukčního toku.

- B_i bude mít opačnou orientaci než vektor B . Vektor B_i má směr od vás (tedy do obrázku). A směr indukovaného proudu? Palec pravé ruky ve směru B_i (tj. do obrázku) a zahnuté prsty vám určí směr indukovaného proudu jak vidíte na O 3.5.1.-1d. Rezistor, který vidíte na obrázku představuje celkový ohmický odpor R obvodu.

O 3.5.1.-1d



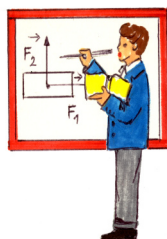
T 3.5.1.-6

Pokud si prohlédnete obr. 3.5.1.-1d pozorně zjistíte, že je „nějak divný“. Liší se od všech elektrických obvodů, se kterými jsme se dosud setkali. V čem?

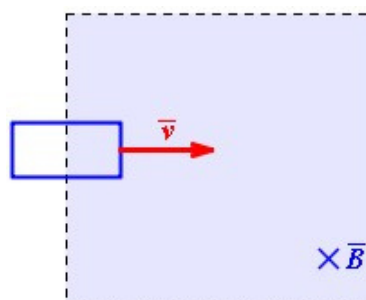
?

V obvodu se indukuje elektromotorické napětí U_i , obvodem prochází indukovaný proud, jehož směr v obvodu jsme určili pomocí Lenzova pravidla. Prochází-li obvodem proud, musí být podél obvodu elektrické pole, které zajistí pohyb vodivostních elektronů. Toto **indukované elektrické pole** je vyvoláno měnícím se magnetickým indukčním tokem. Můžeme tedy udělat závěr:

Měnění se magnetické pole vytváří pole elektrické.



RU 3.5.1.-2. Na obrázku O 3.5.1.-9 vidíte pravoúhlou vodivou smyčku, kterou táhneme konstantní rychlostí přes oblast (modrá), v níž je vytvořeno homogenní magnetické pole indukce B . Vektor B je kolmý na rovinu obrázku a míří od vás. Odpovídejte na následující otázky.



O 3.5.1.-9

1. Ve kterém případě je indukční tok závitem maximální?

Uvažujte následující fáze pohybu:

- celý závit je mimo pole (vlevo)
- závit vstupuje do pole
- celý závit je v poli
- závit vystupuje z pole
- celý závit je mimo pole (vpravo)

2. Ve kterém případě je indukční tok závitem minimální?

Uvažujte následující fáze pohybu:

- celý závit je mimo pole (vlevo)
- závit vstupuje do pole
- celý závit je v poli
- závit vystupuje z pole
- celý závit je mimo pole (vpravo)

3. Ve kterém případě indukční tok roste?

Uvažujte následující fáze pohybu:

- celý závit je mimo pole (vlevo)

- b) závit vstupuje do pole
- c) celý závit je v poli
- d) závit vystupuje z pole
- e) celý závit je mimo pole (vpravo)

4. Ve kterém případě indukční tok klesá?

Uvažujte následující fáze pohybu:

- a) celý závit je mimo pole (vlevo)
- b) závit vstupuje do pole
- c) celý závit je v poli
- d) závit vystupuje z pole
- e) celý závit je mimo pole (vpravo)

5. Ve kterém případě je indukované napětí $U_i = 0$ V

Uvažujte následující fáze pohybu:

- a) celý závit je mimo pole (vlevo)
- b) závit vstupuje do pole
- c) celý závit je v poli
- d) závit vystupuje z pole
- e) celý závit je mimo pole (vpravo)

6. Ve které případě prochází obvodem indukovaný proud I ?

Uvažujte následující fáze pohybu:

- a) celý závit je mimo pole (vlevo)
- b) závit vstupuje do pole
- c) celý závit je v poli
- d) závit vystupuje z pole
- e) celý závit je mimo pole (vpravo)

7. Ve kterém případě je směr indukovaného proudu souhlasný se směrem pohybu hodinových ručiček ?

Uvažujte následující fáze pohybu:

- a) celý závit je mimo pole (vlevo)
- b) závit vstupuje do pole
- c) celý závit je v poli
- d) závit vystupuje z pole
- e) celý závit je mimo pole (vpravo)

8. Ve kterém případě je směr indukovaného proudu opačný k pohybu hodinových ručiček?

Uvažujte následující fáze pohybu:

- a) celý závit je mimo pole (vlevo)
- b) závit vstupuje do pole
- c) celý závit je v poli
- d) závit vystupuje z pole
- e) celý závit je mimo pole (vpravo)

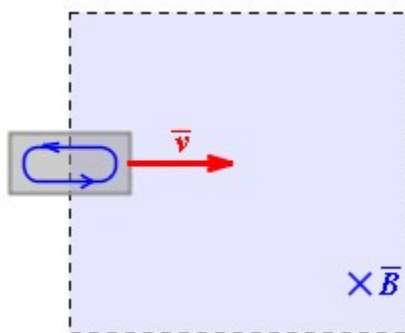
?



T 3.5.1.-7

Máte doma indukční kamna?

Na O 3.5.1.-9 jsme protahovali magnetickým polem uzavřenou vodivou smyčku. Vodivostní elektrony, tvořící indukovaný proud, se pohybovaly pouze ve vodiči, který tvoří uzavřenou smyčku. Pokud nahradíme vodivou desku (obr. O 3.5.1.-10), kterou protahovat magnetickým polem, bude se vstupu resp. výstupu z magnetického indukovat proud. Vodivostní elektrony indukovaný proud v desce nyní krouží jako voda ve vířivé pračce. Tyto proudy **proudy** nebo taky Foucaultovy proudy.

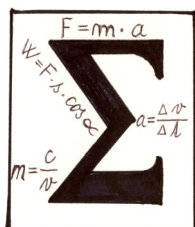


pohybovaly
vodivou
smyčku vodivou
budeme
v desce při
pole rovněž
tvořící
v desce podobně
nazýváme **vířivé**

Vířivé proudy představují ztráty energie, protože se jimi přeměňuje elektrická energie na vnitřní energii vodivé látky a látka se zahřívá. Abychom omezili ztráty způsobené vířivými proudy např. v jádrech transformátorů, sestavují se jádra z navzájem izolovaných plechů.

Vířivé proudy umíme využít taky pozitivně. Ve vodičích, které se pohybují v magnetickém poli se indukují vířivé proudy. Tyto vířivé proudy svými účinky brzdí pohyb vodiče. Toho se využívá např. k tlumení pohybu systémů elektrických měřících přístrojů, v indukčních brzdách atd.

Zahřívání vodivých materiálů vířivými proudy se využívá při tzv. indukčním ohřevu. Při vaření na indukčních kamnech je cívka, umístěná přímo pod varnou plochou, napájena vysokofrekvenčním střídavým proudem. Magnetické pole vytvořené tímto proudem se periodicky mění a indukuje proud ve dně vodivé nádoby. Materiál nádoby má nenulový odpor, vyvíjí se v ní teplo a vy můžete vařit. Sama varná plocha se nezahřívá. Pokud si myslíte, že máte doma technickou novinku vězte, že fyzikální princip na jehož základě vaše „novinka“ pracuje je znám zhruba 150 let.



Mění-li se v čase magnetický indukční tok Φ_m plochou ohraničenou uzavřenou vodivou smyčkou, vzniká ve smyčce elektromotorické napětí a smyčkou bude procházet elektrický proud. Tento děj se nazývá **elektromagnetická indukce**.

Podle Faradayova zákona pro indukované elektromotorické napětí platí

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.1.-1}$$

Tento vztah lze použít k výpočtu okamžitého indukovaného napětí v případě, že změna indukčního toku Φ_m je rovnoměrná.

Nahradíme-li smyčku hustě navinutou cívkou o N závitů, pak indukované napětí je

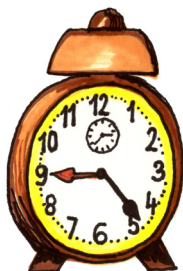
$$U_i = -N \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.1.-2}$$

Směr indukovaného proudu určíme podle Lenzova pravidla. Indukovaný proud má takový směr, že jeho magnetické pole brání té změně magnetického pole, která proud vyvolává.

3.5.2. Vlastní a vzájemná indukce



- vysvětlit co je indukčnost cívky
- vysvětlit co je vlastní indukce
- znát vztah pro indukované elektromotorické napětí vzniklé při vlastní indukci
- vysvětlit vliv cívky při vypnutí a zapnutí zdroje
- vysvětlit co je vzájemná indukce
- umět definovat vzájemnou indukčnost
- znát vztah pro indukované elektromotorické napětí vzniklé při vzájemné indukci



2 hodiny

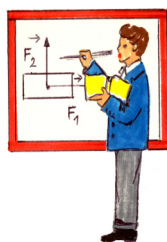


Magnetické pole cívky. Magnetický indukční tok. Elektromotorické napětí.



T 3.5.2.-1

Kondenzátor – kapacita	Cívka - indukčnost
V kapitole 3.1.8. jsme viděli, že k vytvoření elektrického pole můžeme použít kondenzátor. Za základní typ kondenzátoru jsme považovali deskový kondenzátor. Elektrické pole mezi deskami kondenzátoru považujeme za homogenní (vyjma okrajů desek, kde se projevuje rozptyl elektrického pole). Mezi nábojem Q kondenzátoru a napětím U mezi jeho deskami je přímá úměrnost $Q = C \cdot U \quad (\text{V 3.1.8.-1})$ Konstanta úměrnosti C se nazývá kapacita kondenzátoru. $C = \frac{Q}{U}$ Kapacita C je pro daný kondenzátor konstantou. Změnit kapacitu kondenzátoru můžeme - změnou jeho konstrukčních vlastností - změnou prostředí v prostoru mezi elektrodami. Jednotkou kapacity je farad (F).	Magnetické pole můžeme vytvořit cívkou. Jako základní typ cívky uvažujeme solenoid (dlouhou válcovou cívku). Pokud nebude řečeno jinak, předpokládáme solenoid se vzduchovým jádrem. Magnetické pole uvnitř solenoidu považujeme za homogenní (vyjma konců solenoidu, kde se projevuje rozptyl magnetického pole). Proud I, procházející jedním závitem cívky, vytváří uvnitř závitu indukční tok Φ_m. Všechny N závitů cívky vytvoří celkový indukční tok $N \cdot \Phi_m$. Mezi velikostí tohoto indukčního toku a proudem I je přímá úměrnost. Čím větší bude proud v cívce, tím větší bude velikost magnetické indukce B uvnitř cívky a tím větší bude indukční tok. Tedy $N \cdot \Phi_m = L \cdot I \quad \text{V 3.5.2.-1}$ Konstanta úměrnosti L se nazývá (vlastní) indukčnost cívky. $L = \frac{N \cdot \Phi_m}{I} \quad \text{V 3.5.2.-2}$ Indukčnost cívky L je pro danou cívku konstantní. Závisí na - jejich konstrukčních vlastnostech - jakosti jádra Jednotkou indukčnosti je henry (H).



RU 3.5.2.-1. Vyjádřete obecně indukčnost solenoidu se vzduchovým jádrem.

Tento úkol splníte velmi snadno sami, pokud si dosadíte do vztahu V 3.5.2.-2.

Uvažujte solenoid s N závitů. Jeho délka je l , průřez závitů cívky je S . Relativní permeabilita vzduchu je přibližně rovna vakuu, tj. $\mu_r = 1$.

Řešení:

Prochází-li cívkou proud I , vzniká v dutině cívky magnetické pole indukce

$B =$

?

Indukční tok procházející jedním závitem je

$\Phi_m =$

?

Indukční tok procházející cívkou je $N \cdot \Phi_m$. Teď už víte všechno co potřebujete k dosazení do V 3.5.2.-2. Pro indukčnost cívky dostanete $L =$

?



T 3.5.2.-2

Vyřešením úlohy RU 3.5.2.-1. jste došli k závěru, že indukčnost solenoidu je

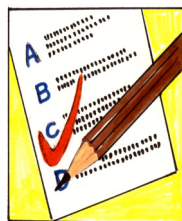
$$L = \mu_o \frac{N^2 \cdot S}{l} \quad \text{V 3.5.2.-3}$$

Indukčnost solenoidu (který nemá ve svém okolí magnetické materiály) závisí pouze na geometrii cívky, tj. na

- čtverci počtu závitů N^2

- průřezu závitů cívky S

- délce cívky l



KO 3.5.2.-1. Uvažujte dvě cívky:

1.cívka má N závitů její délka je l velikost průřezu závitů cívky je S

2.cívka má $2.N$ závitů její délka je $2.l$ velikost průřezu závitů cívky je S

Která cívka má větší indukčnost?

a) 1.cívka

b) 2.cívka

c) obě mají stejnou indukčnost

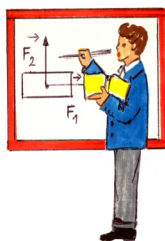
?

KO 3.5.2.-2. Jak se změní vztah pro indukčnost solenoidu V 3.5.2.-3, bude-li v dutině jádro o relativní permeabilitě μ_r ?

?

KO 3.5.2.-3. Při kontrole ocelových nosníků, lan atd. se může postupovat takto: lano se zmagnetuje a navleče se na ně cívka spojená s galvanometrem. Kontrolované lano tvoří jádro cívky. Při posouvání cívky podél nosníku začne galvanometrem procházet proud, je-li ve struktuře kontrolovaného výrobku trhлина nebo dutina. Vysvětlete.

?



RU 3.5.2.-4. Indukčnost hustě navinuté cívky o 400 závitů je 8 mH. Vypočítejte magnetický indukční tok každým závitom cívky, jestliže jí protéká proud 5 mA.

Řešení: $N = 400$, $L = 8 \cdot 10^{-3}$ H, $I = 5 \cdot 10^{-3}$ A

Vyjdeme ze vztahu V 3.5.2.-1

$$N \cdot \Phi_m = L \cdot I$$

a dosadíme: $\Phi_m = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 400 = 1 \cdot 10^{-7}$

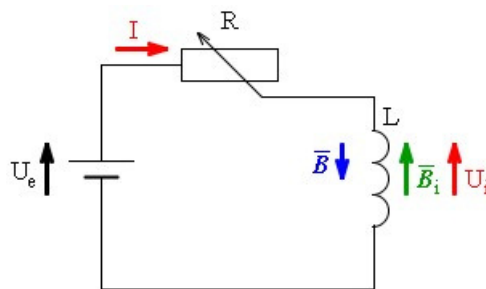
Magnetický indukční tok každým závitom cívky je $1 \cdot 10^{-7}$ Wb.



T 3.5.2.-3

Na obrázku O 3.5.2.-1 je cívka indukčnosti L zapojena přes reostat R ke zdroji konstantního elektromotorického napětí U_e .

Reostatem měníme proud v obvodu a tedy i v cívce. Když se proud v cívce mění, mění se velikost magnetické indukce B v cívce a tedy i indukční tok cívkou. Podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce vzniká v cívce indukované napětí.



O 3.5.2.-1

V každé cívce, v níž se mění elektrický proud, vzniká indukované elektromotorické napětí.

Tento jev se nazývá **vlastní indukce**.

Kolik voltů se naindukuje na cívce?

Podle V 3.5.1.-2 je indukované napětí na cívce s N závitů

$$U_i = -N \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t}$$

podle V 3.5.2.-1 platí

$$N \cdot \Phi_m = L \cdot I$$

Změna proudu v cívce má za následek změnu indukčního toku (počet závitů N a indukčnost cívky L jsou konstanty). Pokud budeme měnit proud rovnoměrně, můžeme psát

$$N \cdot \Delta \Phi_m = L \cdot \Delta I$$

$$\Delta \Phi_m = L \cdot \Delta I / N$$

Dosadíme-li do rovnice V 3.5.2.-2, dostaneme

$$U_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.2.-4}$$

V každé cívce vzniká indukované napětí, kdykoli se v ní mění proud. Sama velikost proudu na indukované napětí nemá vliv, záleží jen na **rychlosti změny proudu** $\Delta I / \Delta t$.

Směr indukovaného proudu určíme z Lenzova pravidla.

Vraťte se k O 3.5.2.-1.

Předpokládejte, že proud I budeme **zvyšovat**. Indukované napětí má v tomto případě

V případě, že proud I budeme **snížovat**, indukované napětí bude mít **stejnou polaritu** jako má zdroj.

Pokud $\Delta I > 0$, tj. proud roste je $U_i < 0$, tj. má opačnou polaritu než je napětí na zdroji.

A cartoon illustration of a pencil pointing to a checklist. The checklist has four options labeled A, B, C, and D. Option C is marked with a large red checkmark. The background is yellow with a grid pattern.

1) z 0 A na 2 A za 1 s

Ve kterém případě se indukuje větší napětí?

a) v prvním případě

b) v druhém případě

c) v obou případech stejně

d) nelze rozhodnout, neznáme indukčnost cívky

?

Jak velké napětí se indukuje na cívce? $U_i =$

?

$$1) I = 3.t \quad (\text{A}, \text{s})$$

Ve kterém případě se bude na cívce indukovat větší napětí?

a) v prvním případě

b) v druhém případě

c) v obou případech stejně

d) nelze rozhodnout, neznáme indukčnost cívky

?

V 1.cívce rovnoměrná změna proudu 2 A/s má za následek vznik indukovaného napětí $0,4 \text{ V}$.

V 2.cívce rovnoměrná změna proudu 1 A/s má za následek vznik indukovaného napětí $0,5 \text{ V}$.

a) cívka 1.

b) cívka 2.

c) obě cívky stejnou

?

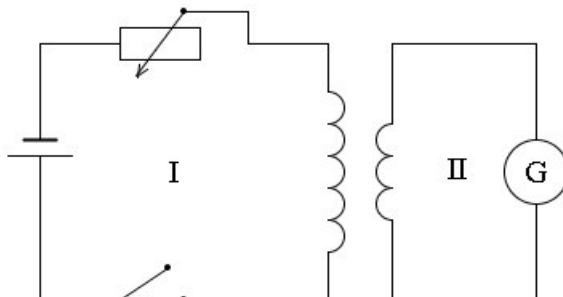
?

7



T 3.5.2.-4

Vraťme se nyní k O 3.5.1.-3. Proud procházející primární cívkou vytváří magnetické pole. Předpokládejme, že primární a sekundární cívka jsou v takové poloze, aby indukční tok závitů sekundární cívky, která se nachází v magnetickém poli primární cívky, byl nenulový.



O 3.5.1.-3

Měníme-li indukční tok tím, že měníme proud v primárním obvodu, vzniká v sekundární cívkce indukované elektromotorické napětí. V tomto případě hovoříme o **vzájemné indukci**. Předpokládejme, že primárním obvodem prochází proud I_1 . Pokud bude proud I_1 konstantní, v sekundárním obvodu se nebude indukovat napětí. Měníme-li proud I_1 , bude se v sekundárním obvodu indukovat elektromotorické napětí U_{i2} . Bude-li se proud I_1 měnit rovnoměrně, bude platit

$$U_{i2} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.2.-5}$$

kde M je konstanta úměrnosti, charakterizující „vazbu“ obou obvodů. Závisí na

- počtu závitů obou cívek
- délce obou cívek
- průřezu závitů obou cívek
- na vzájemné poloze cívek

Říkáme jí **vzájemná indukčnost** a její jednotka je henry (H).

O vazbě mezi obvody hovoříme proto, že proměnný proud I_2 v sekundární cívkce je příčinou vzniku indukovaného napětí U_{i1} v primární cívkce. Při rovnoměrné změně proudu I_2 bude

$$U_{i1} = -M \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$

kde vzájemná indukčnost M je stejná jako ve vztahu V 3.5.2.-5.

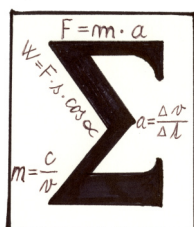
T 3.5.2.-5

Co říci na závěr?

Podmínkou vzniku indukovaného napětí v uzavřené vodivé smyčce je změna indukčního toku, který prochází plochou vymezenou touto smyčkou. Protože $\Phi_m = B \cdot S \cos \alpha$, lze změnu indukčního toku realizovat následujícími způsoby

- **změnou plochy S**
- **změnou indukce B**
- **změnou úhlu α**

První dva způsoby jsme již diskutovali. Třetí možnost se budeme zabývat v následující kapitole.



Prochází-li elektrický proud cívkou o N závitů je indukční tok každým závitěm Φ_m a indukční tok cívkou je $N \cdot \Phi_m$. Tento tok je přímo úměrný

proudu I , který prochází cívkou. **Indukčnost L** cívky pak je

$$L = \frac{N \cdot \Phi_m}{I} \quad \text{V 3.5.2.-2}$$

Jednotkou indukčnosti v soustavě SI je henry (H).

Pro solenoid s vakuovým (přibližně vzduchovým) jádrem lze odvodit vztah

$$L = \mu_0 \frac{N^2 \cdot S}{l} \quad \text{V 3.5.2.-3}$$

Mění-li se proud I v cívce s indukčností L , indukuje se v ní elektromotorické napětí

$$U_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.2.-4}$$

Tento děj nazýváme **vlastní indukce**.

Jsou-li dvě cívky blízko sebe, pak proměnný proud v jedné z nich indukuje elektromotorické napětí ve druhé cívce

$$U_{i2} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad \text{V 3.5.2.-5}$$

respektive

$$U_{i1} = -M \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$

Konstantu úměrnosti M nazýváme **vzájemnou indukčnost** a tento děj nazýváme **vzájemná indukce**.

3.5.3. Vznik střídavého proudu



- vědět, že střídavé napětí vzniká elektromagnetickou indukcí při periodických změnách indukčního toku
- umět popsat časový průběh střídavého proudu a napětí
- vysvětlit fyzikální význam veličin popisujících střídavé napětí a proud
- vysvětlit fyzikální význam efektivní hodnoty
- umět definovat výkon střídavého proudu
- vysvětlit rozdíl mezi činným a zdánlivým výkonem
- znát fyzikální smysl účinníku
- vysvětlit funkci transformátoru



3 hodiny



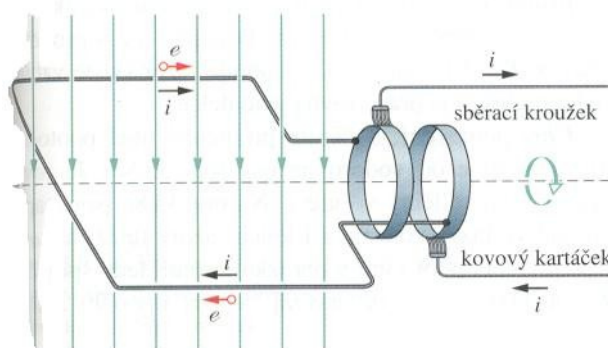
Magnetický indukční tok. Úhlová rychlost. Základní vlastnosti harmonického pohybu. Ohmův zákon. Kirchhoffovy zákony. Joule – Lenzův zákon.



T 3.5.3.-1

Na obrázku O 3.5.3.-1 vidíte jednoduchý model generátoru střídavého napětí – alternátoru.

O 3.5.3.-1



My ale začneme výklad u obrázku O 3.5.3.-2. V homogenním magnetickém poli indukce B je umístěna obdélníková vodivá smyčka. Její plocha má velikost S . Pokud je smyčka v poloze 1, vektor její normály $\vec{n}$ svírá s vektorem $\vec{B}$ úhel $\alpha = 0^\circ$. Plochou závitů prochází maximální indukční tok $\Phi_m(\max) = B \cdot S$. Přinutíme-li vodivou smyčku točit se, bude se měnit úhel α mezi vektorem $\vec{n}$ a $\vec{B}$. Předpokládejme, že se smyčka otáčí s konstantní úhlovou rychlostí ω , která je definována takto:

$$\omega = \alpha / t \quad \text{a z toho plyne} \quad \alpha = \omega \cdot t \quad (\text{a})$$

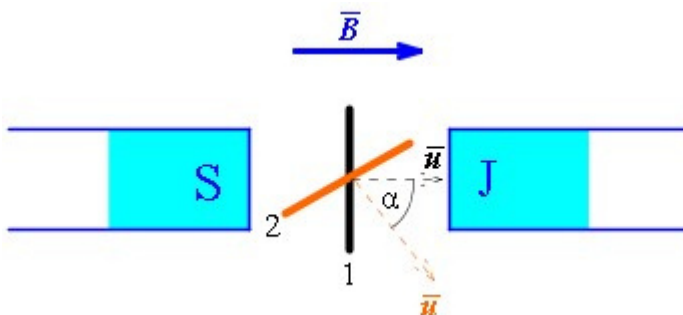
Podle V 3.3.2.-1 je magnetický indukční tok procházející plochou smyčky

$$\Phi_m = B \cdot S \cos \alpha$$

a dosadíme-li za α z rovnice (a) můžeme psát

$$\Phi_m = B \cdot S \cos \omega \cdot t \quad \text{V 3.5.3.-1}$$

Vidíme, že bude-li nedeformovatelná vodivá smyčka (S je konstantní) rotovat v homogenním magnetickém poli ($B = \text{konstantní}$), bude se **indukční tok plochou smyčky měnit v závislosti na čase** podle vztahu V 3.5.3.-1. Dojde ke vzniku indukovaného napětí a je-li smyčka částí uzavřeného obvodu, bude obvodem procházet indukovaný proud. Ale pozor! Změna indukčního toku není rovnoměrná. Pro indukované napětí U_i již nemůžeme použít rovnici V 3.5.1.-1 ale rovnici V 3.5.1.-



1a

Pokud bychom provedli příslušnou derivaci, dostaneme

O 3.5.3.-2

$$U_i = B.S. \omega \sin \omega.t$$

V 3.5.3.-2

To je indukované napětí na jednom závitě. Pokud v magnetickém poli rotuje cívka s N závitů, je indukované napětí na této cívkě

$$U_i = N.B.S. \omega \sin \omega.t$$

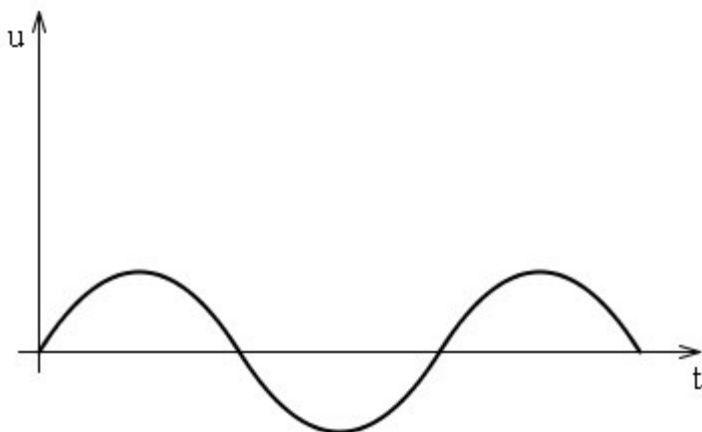
V 3.5.3.-3

Proměnné indukované elektromotorické napětí má harmonický průběh a nazýváme jej **střídavé napětí**. Zapisujeme jej takto

$$u = U_m \sin \omega.t$$

V 3.5.3.-4

u	je okamžitá hodnota střídavého napětí	(volt)
$U_m = B.S.\omega$	je maximální hodnota střídavého napětí – amplituda napětí	(volt)
$U_m = N.B.S.\omega$	(pro cívku)	
$\omega.t$	je fáze	(rad)
ω	je úhlová frekvence	(rad.s ⁻¹)
$\omega = 2 \pi.f = 2 \pi/T$		
f	je frekvence	(s ⁻¹ = Hz)
T	je perioda	(s)



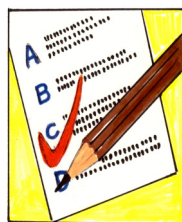
O 3.5.3.-3



O 3.5.3.-4

Časový diagram střídavého napětí vidíte na O 3.5.3.-3

Ve schématech značíme zdroj střídavého napětí symbolem, který vidíte na O 3.5.3.-4.



KO 3.5.3.-1. Na závitě, který rotuje v magnetickém poli se indukuje napětí

$$u = 0,5 \sin 2 \pi.t \quad (\text{V}, \text{s})$$

(V,s) znamená: napětí je ve voltech, čas v sekundách. Odpovídejte na otázky a nezapomeňte uvést jednotky.

- Jaká je amplituda napětí?
- S jakou úhlovou frekvencí rotuje závit?
- Jak velká je fáze?

- d) Kolik otáček vykoná závit za jednu sekundu?
e) Jak dlouho trvá závitu jedna otáčka?

?

KO 3.5.3.-2. Napište rovnici pro okamžitou hodnotu indukovaného napětí víte-li, že amplituda napětí je 2 V a závit rotuje s frekvencí 10 Hz.

$u =$

?

KO 3.5.3.-3. Střídavé napětí je dáno rovnicí $u = 2 \cdot \sin(\pi/2) \cdot t$ (V,s).

Do připravené tabulky dopočítejte fázi, sinus fáze a okamžitou velikost napětí pro daný čas.

t (s)	$\omega \cdot t$ (rad)	$\sin \omega \cdot t$	u (V)
0			
1/3			
1			
5/3			
2			
3			
?			

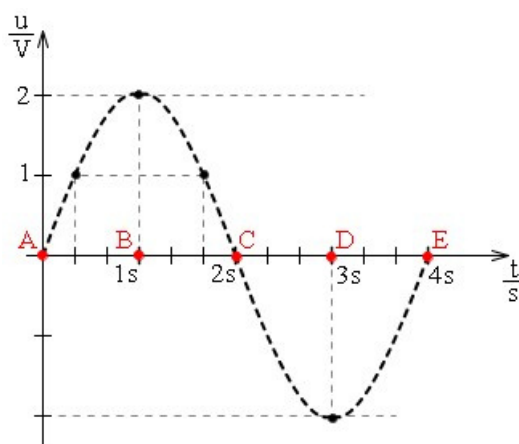
KO 3.5.3.-4. Na O 3.5.3.-5 vidíte časový diagram střídavého napětí na zdroji

$$u = 2 \cdot \sin(\pi/2) \cdot t$$

Diagram odpovídá tabulce, kterou jste sestavili v KO 3.5.3.-3. Odpovídejte na následující otázky.

- a) Ve kterých bodech je velikost okamžitého napětí na zdroji rovna nule?
b) Ve kterých bodech je na zdroji maximální napětí?
c) Ve kterých bodech se mění polarita napětí na svorkách zdroje?
d) Kolikrát se změní polarita napětí na svorkách zdroje za dobu jedné periody (T)

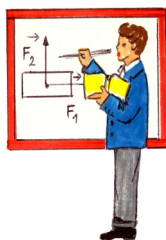
?



O 3.5.3.-5

KO 3.5.3.-5. Střídavé napětí má frekvenci 50 Hz. Kolikrát se změní polarita napětí na svorkách zdroje?

?



RU 3.5.3.-1. Obdélníková cívka má N závitů a délky stran x a y . Navrhněte cívku (N, x, y), aby při 60 otáčkách za sekundu v magnetickém poli indukce 0,5 T se na ní generovalo maximální napětí 150 V.

Řešení: $f = 60 \text{ Hz}$, $B = 0,5 \text{ T}$, $U_m = 150 \text{ V}$

Podle V 3.5.3.-3 pro maximální napětí platí $U_m = N \cdot B \cdot S \cdot \omega$,

úhlová frekvence je

$$\omega = 2 \pi \cdot f$$

plocha závitů je

$$S = x \cdot y$$

Vezmeme-li všechny tyto vztahy do úvahy, můžeme psát

$$U_m = N \cdot B \cdot x \cdot y \cdot 2\pi \cdot f$$

Aby cívka splnila podmínky dané v zadání, musí pro ní platit

$$N \cdot x \cdot y = U_m / (2\pi \cdot f \cdot B)$$

$$\text{Dosadíme: } N \cdot x \cdot y = 150 / (2\pi \cdot 60 \cdot 0,5) = 5 / (2\pi) \text{ m}^2$$

Aby cívka splnila dané podmínky musí součin $N \cdot S$ (tj. počet závitů krát plocha závitů) být roven $5 / (2\pi) \text{ m}^2$.



T 3.5.3.-2

Je-li rotující smyčka součástí uzavřeného obvodu, budí v něm střídavé indukované napětí proud, který má rovněž harmonický průběh se stejnou úhlovou frekvencí ω . Nazýváme jej **střídavý proud**. Proud můžeme vyjádřit vztahem

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad \text{V 3.5.3.-5}$$

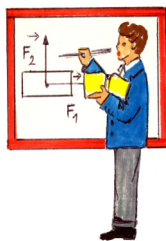
i je okamžitá hodnota střídavého proudu (ampér),

I_m je maximální hodnota střídavého proudu – amplituda proudu (ampér),

φ je **fázový posun** proudu vůči napětí (nebo fázový rozdíl mezi proudem a napětím).

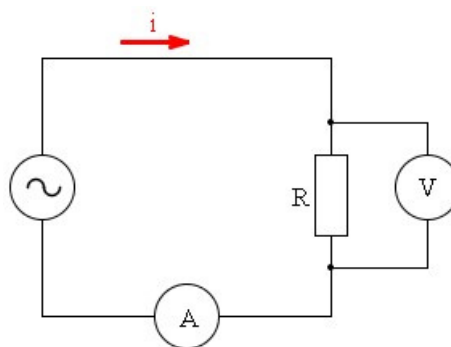
Ostatní symboly mají stejný význam jako u napětí.

Pokud je fázový posun φ roven nule říkáme, že proud a napětí jsou **ve fázi**. To ale obecně neplatí, fázový posun závisí na vlastnostech obvodu, který je ke generátoru připojen.



RU 3.5.3.-2. Na obrázku O 3.5.3.-6 je zapojen rezistor (jehož odpor je R) ke střídavému zdroji

$u = U_m \sin \omega \cdot t$. Jaký je fázový posun mezi proudem v obvodu a napětím na rezistoru?



O 3.5.3.-6

Řešení: Podle II. Kirchhoffova zákona (T 3.2.6.-2b) platí

$$u = u_R \quad (\text{a})$$

$$\text{kde okamžité napětí na zdroji je } u = U_m \sin \omega \cdot t \quad (\text{b})$$

$$\text{a okamžité napětí na rezistoru je } u_R = i \cdot R \quad (\text{c})$$

Dosadíme rovnice (a) a (b) do (c)

$$U_m \sin \omega \cdot t = i \cdot R \quad \text{a odtud} \quad i = (U_m / R) \sin \omega \cdot t$$

Pro okamžitý proud platí $i = I_m \sin \omega.t$
 kde $I_m = U_m / R$ je amplituda proudu.

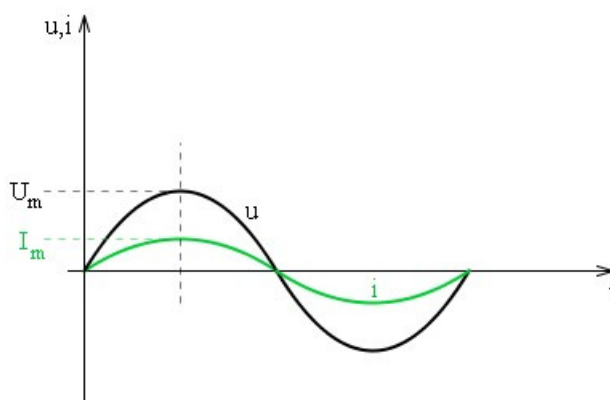
Závěr:

Napětí na rezistoru: $u = U_m \sin \omega.t$ fáze je $\omega.t$

Proud v obvodu $i = I_m \sin \omega.t$ fáze je $\omega.t$

Napětí na rezistoru a proud procházející rezistorem jsou **ve fázi**.

Časové diagramy střídavého proudu a napětí v obvodu s rezistorem vidíte na O 3.5.3.-7.



O 3.5.3.-7



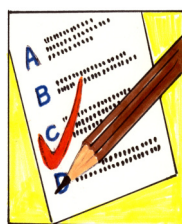
T 3.5.3.-3

Ve střídavém obvodu s cívkou proud a napětí na cívce již nejsou ve fázi. Proud je fázově zpožděn za napětím. To znamená, že proud dosáhne maxima později než napětí na cívce. Příčinou je vznik indukovaného napětí na cívce.

Ve střídavém obvodu s kondenzátorem rovněž proud a napětí na kondenzátoru nejsou ve fázi.

Kondenzátor se v obvodu střídavého proudu periodicky nabíjí a vybíjí, napětí na kondenzátoru je fázově zpožděno za proudem

Ve střídavém obvodu RLC, tj. v obvodu s cívkou i s kondenzátorem (R je ohmický odpor obvodu) můžeme vhodnou volbou kapacity C a indukčnosti L dosáhnout toho, že vlivy indukčnosti a kapacity na napětí v obvodu se navzájem ruší a obvod se chová stejně jako jsme viděli v RU 3.5.3.-2. Proud a napětí jsou ve fázi. Je to případ **rezonance** obvodu.



KO 3.5.3.-6. Vraťte se ke kontrolní otázce KO 3.5.3.-4. a doplňte v tabulce proud i , který v daném čase rezistorem odporu $R = 3 \Omega$ prochází.

t (s)	$\omega.t$ (rad)	$\sin \omega.t$	u (V)	i (A)
0	0	0	0	
1/3	$\pi/6$	0,5	1	
1	$\pi/2$	1	2	
5/3	$5\pi/6$	1/2	1	
2	π	0	0	
3	$3\pi/2$	-1	-2	

?

KO 3.5.3.-7. Proč vnímáme světlo žárovky připojené na střídavé napětí 230 V, 50 Hz jako klidné (neblíká)?

?



T 3.5.3.-4

Koupíte-li si nějaký spotřebič, na štítku najdete mimo jiné údaj $U = 230 \text{ V}$. Jaké je to napětí?

- a) okamžité
- b) maximální
- c) střední
- d) průměrné – zvané efektivní

?

Co je to efektivní hodnota napětí a proudu?

V textu T 3.2.4.-2 jsme uvedli zákon Jouleův – Lenzův. Prochází-li rezistorem odporu R proud, na rezistoru se vyvine teplo. To platí i v případě, že rezistorem prochází střídavý proud.

Teplo E vyvinuté při průchodu **stejnoseměrného proudu** I rezistorem o odporu R v čase T je podle V 3.2.4.-2

$$E = R \cdot I^2 \cdot T \quad (a)$$

a pokud proud I nahradíme z Ohmova zákona $I = U/R$, kde U je napětí na rezistoru, dostaneme

$$E = U^2 \cdot T / R \quad (b)$$

Při výpočtu tepla v případě **střídavého proudu** musíme mít na paměti, že okamžitý proud (napětí) se harmonicky mění, tj. v každém okamžiku má jinou hodnotu i (respektive u) a musíme proto volit adekvátní matematické metody. Výpočtem zjistíme, že prochází-li střídavý proud rezistorem R po dobu jedné periody T , vyvine se na rezistoru teplo

$$E = \frac{1}{2} R \cdot I_m^2 \cdot T \quad (c)$$

kde I_m je amplituda proudu.

Pokud proud I_m nahradíme z Ohmova zákona $I_m = U_m / R$, (U_m je amplituda napětí na rezistoru), vztah (c) má tvar

$$E = \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R} \cdot T \quad (d)$$

Efektivní hodnota střídavého proudu v určitém časovém intervalu je definována jako hodnota stálého stejnosměrného proudu, který vyvine ve stejném rezistoru za tutéž dobu totéž teplo.

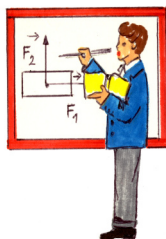
Porovnáme-li rovnici (a) a (c) dostaneme pro efektivní hodnotu proudu I vztah

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{V 3.5.3.-6}$$

Porovnáním rovnic (b) a (d) dostaneme pro efektivní hodnotu napětí U vztah

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad \text{V 3.5.3.-7}$$

Je-li efektivní hodnota napětí v síti 230 V, je amplituda napětí v síti $U_m = 230 \cdot \sqrt{2} \sim 325 \text{ V}$



RU 3.5.3.-3. Určete časové okamžiky v průběhu periody střídavého napětí, při nichž se okamžité napětí rovná efektivní hodnotě napětí.

Řešení: Vyjdeme z rovnice V 3.5.3.-4

$$u = U_m \sin \omega \cdot t \quad (a)$$

podle zadání se okamžité napětí u má rovnat efektivní hodnotě napětí U , tj.

$$u = U \quad (b)$$

pro efektivní hodnotu napětí U platí vztah V 3.5.3.-7

$$U = U_m / \sqrt{2} \quad (c)$$

za úhlovou frekvenci dosadíme

$$\omega = 2 \pi / T \quad (d)$$

Dosadíme-li vztahy (b), (c) a (d) do rovnice (a) dostaneme

$$\frac{U_m}{\sqrt{2}} = U_m \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t$$

a po úpravě

$$\sqrt{2}/2 = \sin (2 \pi / T) / t \quad \text{tedy}$$

$$(2 \pi / T) / t = \pi / 4 \quad (\text{tj. } 45^\circ) \quad \text{nebo} \quad (2 \pi / T) / t = 3\pi / 4 \quad (\text{tj. } 135^\circ)$$

$$1.\text{řešení} \quad t_1 = T/8$$

$$2.\text{řešení} \quad t_2 = 3T/8$$



T 3.5.3.-5

Předpokládejme, že ke střídavému zdroji je zapojen rezistor, cívka a kondenzátor (R,L,C obvod). Zdroj dodává do obvodu energii, která se z části mění

- v teplo nebo v užitečnou práci (elektromotor)
 - na energii elektrického pole kondenzátoru a magnetického pole cívky.
- Energie, která se mění **v teplo nebo v užitečnou práci** za jednotku času definuje **činný výkon** střídavého proudu. Pro velikost činného výkonu střídavého proudu v obecném případě obvodu s rezistorem, cívkou a kondenzátorem platí vztah

$$P = U \cdot I \cos \varphi \quad \text{V 3.5.3.-8}$$

Činný výkon střídavého proudu je tedy roven součinu efektivních hodnot proudu a napětí a kosinu fázového rozdílu (posunu) mezi proudem a napětím. Jednotkou je watt (W).

Činitel $\cos \varphi$ se nazývá **účinník**. Účinník $\cos \varphi$ udává účinnost přenosu energie ze zdroje do spotřebiče. Pro velikost účinníku platí: $0 < \cos \varphi < 1$. Výkon definovaný vztahem V 3.5.3.-8 označujeme jako činný výkon proto, že je jím určena část výkonu, která se v obvodu mění na teplo nebo užitečnou práci.

Pokud je $\varphi = 0$ je $\cos \varphi = 1$ a činný výkon $P = U \cdot I$ je maximální.

Rozhodněte, zda tato situace nastane v případě, že ke střídavému zdroji

a) je zapojen jen rezistor

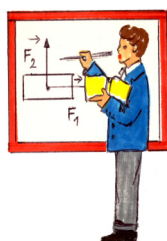
b) je zapojen kondenzátor a rezistor

c) je zapojena cívka a rezistor

?

V obvodu RLC, tj. v obvodu ve kterém je zapojen rezistor, cívka i kondenzátor, může nastat situace kdy $\varphi = 0$. Jak již bylo uvedeno, záleží to na vhodné volbě cívky (L) a kondenzátoru (C).

- Pokud jde o tu část energie zdroje, která se mění na elektrickou a magnetickou energii kondenzátoru a cívky - ta „pendluje“ mezi zdrojem a kondenzátorem respektive cívkou. Tento děj však není spojen s konáním užitečné práce.



RU 3.5.3.-4. Motor připojený na síť 380 V odebírá proud 18 A, jeho činný výkon je 4,5 kW. Jaký je účinník motoru za těchto podmínek?

Řešení: $U = 380 \text{ V}$, $I = 18 \text{ A}$, $P = 4,5 \cdot 10^3 \text{ W}$, $\cos \varphi = ?$

Součin $U \cdot I$ představuje celkovou energii, kterou dodá zdroj za jednu sekundu

do obvodu. Tento výkon nazýváme **zdánlivý výkon P_z** .

$$P_z = U \cdot I \quad \text{V 3.5.3.-9}$$

kde U a I jsou efektivní hodnoty napětí a proudu.

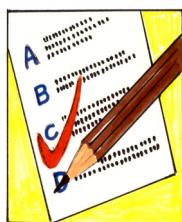
V našem případě je zdánlivý výkon $P_z = 380.18 = 6840 \text{ W}$.

Činný výkon motoru je $P = 4,5 \cdot 10^3 \text{ W}$.

Činný výkon vyjádříme podle V 3.5.3.-8 $P = U \cdot I \cos \varphi$. Dosadíme-li vztah V 3.5.3.-9, dostaneme $P = P_z \cos \varphi$. Pro účinník platí $\cos \varphi = P/P_z$.

Dosadíme-li numericky, dostaneme $\cos \varphi = 4,5 \cdot 10^3 / 6,84 \cdot 10^3 = 0,66$.

Účinník motoru je 0,66 a to znamená, že z celkové energie dodané zdrojem do obvodu se 66 % přemění na práci (resp. teplo).



KO 3.5.3.-8. Které z následujících tvrzení je správné? Zdánlivý výkon je roven činnému výkonu střídavého proudu v obvodu

- a) kde je zapojen pouze rezistor odporu R
- b) ve kterém je proud a napětí ve fázi
- c) kde platí: účinník = 0

d) kde platí: účinník = 1

e) kde fázový posun mezi proudem a napětím = 0

f) kde fázový posun mezi proudem a napětím = 90°

?

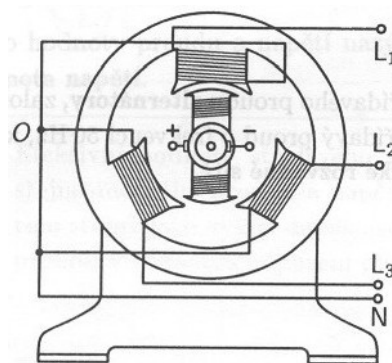


T 3.5.3.-6

Alternátor (viz. O 3.5.3.-1) používaný v elektrárnách se od popsaného principu v textu T 3.5.3.-1 z praktických důvodů poněkud liší. Otáčivý pohyb koná elektromagnet (magnetické pole), který tvoří **rotor** alternátoru. Střídavé napětí se indukuje v soustavě cívek ve **statoru**. U trojfázového

alternátoru tvoří stator tři cívky, jejichž osy svírají vzájemně úhel 120° . Jeden konec cívek je spojen do společného bodu O – uzlu. Vodič spojený s tímto uzlem je **nulovací vodič**, vodiče připojené ke druhému konci cívek jsou **fázové vodiče**. Na O 3.5.3.-8 vodič N je nulovací vodič a vodiče L_1, L_2, L_3 jsou fázové vodiče. Mezi fázovými vodiči a nulovacím vodičem jsou **fázová napětí** u_1, u_2, u_3 . Napětí u_{12}, u_{13}, u_{23} mezi fázovými vodiči nazýváme **napětí sdružená**. Efektivní hodnota sdruženého napětí je $\sqrt{3}$ krát větší než efektivní hodnota fázového napětí.

V naší spotřebitelské síti je frekvence $f = 50 \text{ Hz}$, fázové napětí 230 V a sdružené napětí $230\sqrt{3} \text{ V}$.



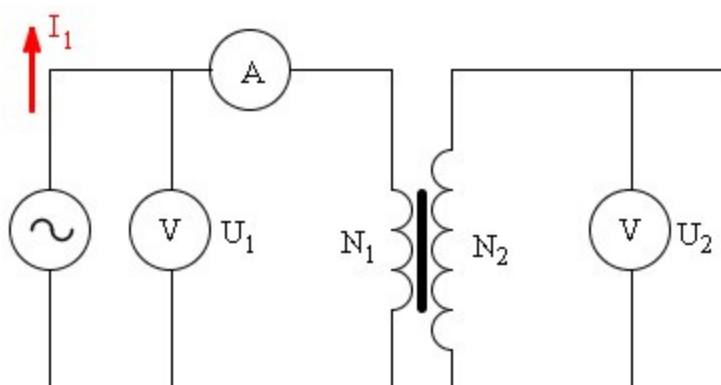
O 3.5.3.-8

T 3.5.3.-7

Požadavek vysoké účinnosti při přenosu energie vede k použití vysokého napětí, což je ovšem v základním rozporu s bezpečností. Potřebujeme tedy zařízení, kterým bychom mohli napětí zvýšit (pro přenos) a snížit (pro spotřebu) tak, aby součin $U \cdot I$ zůstal konstantní. Zařízení, které nám umožňuje zvyšovat nebo snižovat elektrické napětí v obvodu se nazývá

transformátor. Transformátor pracuje na principu elektromagnetické indukce.

Na obrázku O 3.5.3.-9 vidíte dvě cívky (primární a sekundární) na společném ocelovém jádře z měkké oceli. Primární cívka má N_1 závitů, sekundární má N_2 závitů.



O 3.5.3.-9

Primární cívka je připojena ke zdroji střídavého napětí U_1 a prochází jí střídavý proud I_1 (U_1 a I_1 jsou efektivní hodnoty).

Budeme uvažovat jednofázový ideální transformátor, jehož účinnost je 100%.

Řešení provedeme na základě těchto předpokladů:

1) indukční tok primární a sekundární cívkou je stejný

2) příkon transformátoru $U_1 \cdot I_1$ = výkonu transformátoru $U_2 \cdot I_2$

1) Střídavý primární proud vytváří v jádru transformátoru střídavý indukční tok Φ_m . Protože je na jádru navinuto i sekundární vinutí, je to tok i jeho závity. Z Faradayova zákona (V 3.5.1.-1) plyne, že indukované elektromotorické napětí na jednom závitu primární i sekundární cívky je stejné a je rovno

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t}$$

Na N_1 závitěch primární cívky se indukuje celkové napětí

$$U_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \quad (a)$$

a na N_2 závitěch sekundární cívky se indukuje celkové napětí

$$U_2 = -N_2 \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} \quad (b)$$

Z rovnic (a) a (b) dostaneme rovnici pro **transformaci napětí**

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{V 3.5.3.-10}$$

kde U_1 a U_2 jsou efektivní hodnoty.

Poměr $N_2/N_1 = k$ se nazývá **transformační poměr transformátoru**.

Je-li $N_2 > N_1$ je $k > 1$ a hovoříme o transformaci nahoru.

Je-li $N_2 < N_1$ je $k < 1$ a hovoříme o transformaci dolů.

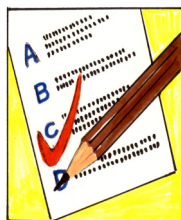
2) Výkon přiváděný ze zdroje na primární vinutí je $U_1 \cdot I_1$, výkon přenášený z primárního vinutí do sekundárního vinutí je $U_2 \cdot I_2$. Předpokládáme-li, že se žádná energie během přenosu neztratí, plyne ze zákona zachování energie

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

a dosadíme-li z V 3.5.3.-10 dostaneme rovnici pro **transformaci proudu**

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{V 3.5.3.-11}$$

Uvedené rovnice jsme odvodili za zjednodušených podmínek. Neuvažovali jsme např. ztráty, které vznikají zahříváním vodičů cívek, vířivými proudy, periodickým magnetováním jádra. Tyto ztráty nelze úplně potlačit, účinnost bývá 90 % - 98 %.

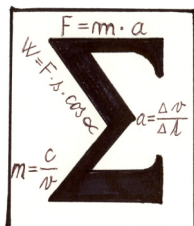


KO 3.5.3.-9. Platí vztah V 3.5.3.-10 i pro amplitudy napětí U_{m1} a U_{m2} ?
?



T 3.5.3.-8

Alternátory umožňují dosáhnout střídavých proudů o kmitočtu až 20 kHz. K získání střídavých proudů o kmitočtu vyšším je nutné postupovat podle jiné metody, která využívá vlastností výboje kondenzátoru v obvodu obsahujícím určitou indukčnost.



Jestliže se v homogenním magnetickém poli otáčí vodivá smyčka s konstantní úhlovou rychlostí ω , mění se indukční tok touto smyčkou. Ve smyčce se indukuje napětí a je-li smyčka částí uzavřeného obvodu, bude obvodem procházet indukovaný proud.

$$u = U_m \sin \omega.t \quad \text{V 3.5.3.-4}$$

$$i = I_m \sin (\omega.t - \varphi) \quad \text{V 3.5.3.-5}$$

Proud a napětí jsou v obecném případě fázově posunuty. Fázový posun φ závisí na jakosti cívky (na indukčnosti L), na jakosti kondenzátoru (na kapacitě C) a na rezistoru (odporu R), pokud jsou v obvodu zapojeny.

Efektivní hodnota střídavého proudu v určitém časovém intervalu je definována jako hodnota stálého stejnosměrného proudu, který vyvine ve stejném rezistoru za tutéž dobu totéž teplo.

Pro efektivní hodnoty střídavého proudu a napětí platí vztahy:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{V 3.5.3.-6}$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad \text{V 3.5.3.-7}$$

Činný výkon střídavého proudu je

$$P = U.I \cos \varphi \quad \text{V 3.5.3.-8}$$

kde $\cos \varphi$ je účinník. Činný výkon je ta část **zdánlivého výkonu** ($P_z = U.I$), která se mění v teplo nebo v užitečnou práci. Jednotkou výkonu je watt (W).

Transformátor se skládá ze železného jádra, na kterém jsou navinuty dvě cívky. Primární cívka s N_1 závitů a sekundární cívka s N_2 závitů. Jestliže primární cívku připojíme ke zdroji střídavého proudu, pro napětí na primárním a sekundárním vinutí platí

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

V 3.5.3.-10

a mezi proudy platí vztah

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

V 3.5.3.-11

Klíč

3. Elektromagnetické pole

3.1. Elektrostatika

3.1.1. Elektrický náboj

KO 3.1.1-1.

a) Je-li vodič nabitý kladně, má nedostatek volných elektronů. Pokud ho uzemníme, přechází elektrony ze země na vodič a snižují jeho kladný náboj. Výsledkem bude elektricky neutrální vodič.

b) Je-li vodič nabitý záporně, je na něm nadbytek volných elektronů. Po uzemnění vodiče budou přecházet elektrony z vodiče do země a tím vodič ztrácí svůj záporný náboj.

KO 3.1.1-2.

a) Nic se nestane, sklo je izolant, nedojde k přechodu volných elektronů.

b) Měď je vodič a má tedy schopnost přenášet elektrický náboj. Nedostatek a přebytek volných elektronů na nabitých kuličkách se vyrovná.

KO 3.1.1-3.

Obtížně, kov i lidské tělo jsou vodiči a tedy jsou schopny vést elektrický náboj.

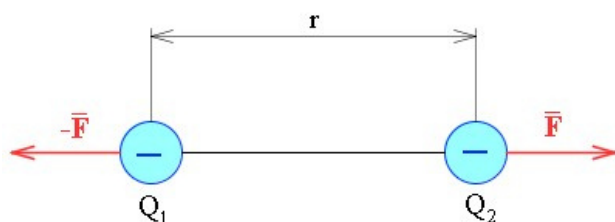
KO 3.1.1-4.

Třením mezi benzinem a stěnou nádoby vzniká elektrický náboj. Při elektrostatickém výboji nahromaděného náboje může dojít ke vznícení benzinových par a vzduchu.

3.1.2. Coulombův zákon

KO 3.1.2-1.

Pro kontrolu si prohlédněte následující obrázek.



RU 3.1.2-2.

$$\bullet \quad F_e = k \frac{e \cdot e}{r^2} \Rightarrow F = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(4 \cdot 10^{-15})^2} = 14 \text{ N}$$

$$\bullet \quad F_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(4 \cdot 10^{-15})^2} = 1,2 \cdot 10^{-35} \text{ N}$$

RU 3.1.2-3.

$$\bullet \quad u = 8^{1/2} \cdot 10^{-2} = 2,2^{1/2} \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

- $r = 2^{1/2} \cdot 10^{-2} \text{ m}$
- $F = k \frac{|Q_1||Q_0|}{r^2} + k \frac{|Q_3||Q_0|}{r^2} = k \frac{|Q_0|}{r^2} (|Q_1| + |Q_3|)$
- $F = 9 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-4}} (2 \cdot 10^{-7} + 6 \cdot 10^{-7}) = 7,2 \text{ N}$

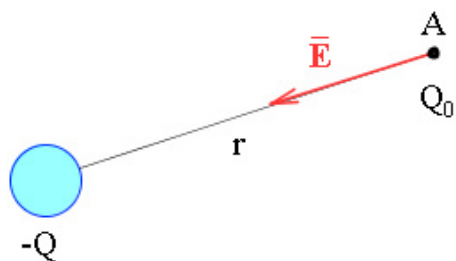
3.1.3. Intenzita elektrostatického pole

RU 3.1.3.-1.

$E = F/Q$ dosadíme $E = 4 \cdot 10^{-3} \text{ N} / 2 \cdot 10^{-7} \text{ C} = 2 \cdot 10^4 \text{ N/C} = 20 \text{ kN/C}$

KO 3.1.3.-1.

Nyní je pole vytvářeno nábojem $-Q$. Intenzita v bodě A bude mít stejnou velikost jako v předešlém případě. Její směr bude ale opačný, protože kladný testovací náboj bude nábojem $-Q$ přitahován. Vidíte to na obrázku O 3.1.3.-2b.



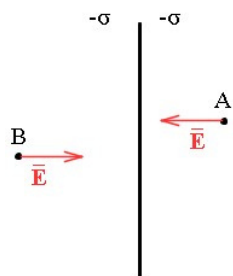
O 3.1.3.-2b

RU 3.1.3.-2.

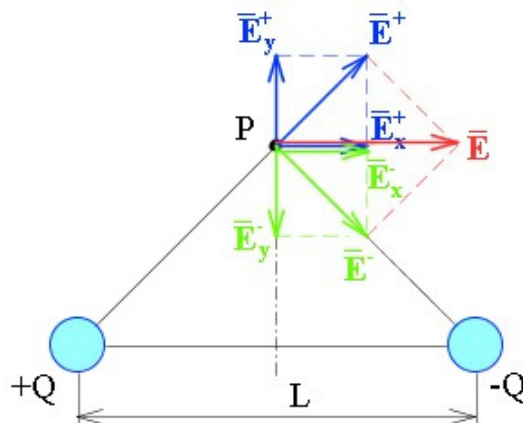
- $r = \sqrt{\frac{k \cdot Q}{E}}$
- $r = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1}{10^3}} = 3 \cdot 10^3 \text{ m}$

KO 3.1.3.-2.

Oba vektory budou mít opět stejnou velikost, budou kolmé na desku, ale budou orientovány směrem k desce (kladný testovací náboj je k záporně nabitě desce přitahován). Vidíte to na obrázku O 3.1.3.-3b.



O 3.1.3.-3b.



O. 3.1.3.-5b

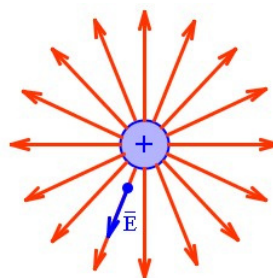
KO 3.1.3.-3.

- a) y-ové složky jsou stejně veliké a opačného směru. Jejich výslednice je nulová.
- b) x-ové složky jsou souhlasného směru a budou se sčítat.
- c) Výsledná intenzita E má směr x-ových složek, tj. je rovnoběžná s ramenem dipólu. Porovnejte si své řešení s obrázkem O 3.1.3.-5b.

KO 3.1.3.-4.

Siločáry začínají na kladném náboji a končí nekonečnu nebo ve vzdálených záporných nábojích jak můžete vidět na obrázku O 3.1.3.-7c.

O 3.1.3.-7c

**KO 3.1.3.-5.**

Musíte si uvědomit dvě věci:

- 1) Siločára je myšlená křivka, jejíž tečna v každém bodě určuje směr intenzity.
- 2) Každému bodu v poli přísluší jeden vektor elektrické intenzity E , tedy jedna velikost a jeden směr intenzity.

KO 3.1.3.-6.

- 1) Na druhé ploše, viz. V 3.1.3.-2
- 2) Na druhé ploše

Učiníme závěr:

Na kulové ploše s menší hustotou siločar je menší intenzita pole. Souvislost mezi velikostí intenzity pole a hustotou siločar neplatí jen pro bodový náboj. Tato souvislost má obecnou platnost.

3.1.4. Bodový náboj v elektrickém poli**KO 3.1.4.-1. a)****KO 3.1.4.-2.**

- 1) $F = E \cdot Q$
- 2) Ano, částice je v homogenním poli.
- 3) Částice se bude v poli pohybovat přímočarým rovnoměrně zrychleným pohybem.
- 4) Z rovnic $F = m \cdot a$ a $F = E \cdot Q$ získáme zrychlení $a = E \cdot Q / m$
- 5) $v = a \cdot t + v_0$ a pokud dosadíte zrychlení $v = (E \cdot Q / m) \cdot t + v_0$
- 6) $s = a \cdot t^2 / 2 + v_0 \cdot t$ a pokud dosadíme zrychlení $s = (E \cdot Q / m) \cdot t^2 / 2 + v_0 \cdot t$
- 7) Stejně, ale z opačné (záporné) desky.

3.1.6. Elektrické napětí

KO 3.1.6.-1.

Pro každý bod ekvipotenciální hladiny platí, že $\varphi_A = \text{konst.}$, tedy součin $E \cdot d_1 = \text{konst.}$, protože E je konstantní, musí být i d_1 konstantní.

Jsou to roviny rovnoběžné s nabitou rovinou. Všimněte si, že siločáry jsou kolmé na ekvipotenciální hladiny.

3.1.7. Vodič a izolant v elektrickém poli

KO 3.1.7.-1. kladným

KO 3.1.7.-2.

1) $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2}$

2) $E = k \frac{Q}{x^2}$

3) $E = 0 \text{ N/C}$

3.1.8. Kapacita

KO 3.1.8.-1. nula

KO 3.1.8.-2. $U' = 2 \cdot U$ protože poměr $Q/U = Q'/U'$

KO 3.1.8.-3.

- 1) Kapacita se zmenší, bude poloviční.
- 2) Kapacita se zvětší, bude dvojnásobná.
- 3) Kapacita se zvětší, bude 5krát větší.

KO 3.1.8.-4. 1) d, 2) c

KO 3.1.8.-5. menší

KO 3.1.8.-6. 1) a , 2)d

RU 3.1.8.-3.

1)

- $C_{23} = 2 \mu\text{F} + 4 \mu\text{F} = 6 \mu\text{F} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
- $1/C_{123} = 1/C_1 + 1/C_{23} \quad 1/C_{123} = 1/3 + 1/6 = 1/2 \quad C_{123} = 2 \mu\text{F} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ a to je kapacita celé kombinace kondenzátorů.

2)

- Celkový náboj $Q_{123} = C_{123} \cdot U$ a po dosazení $Q_{123} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ C}$.
- Náboj na C_1 má velikost $Q_1 = Q_{123} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ C}$.

3)

Napětí na kondenzátoru C_1 je $U_1 = Q_1/C_1 \quad U_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} / 3 \cdot 10^{-6} = 40 \text{ V}$.

3.2. Elektrický proud

3.2.1. Základní pojmy

KO 3.2.1.-1.

Pokud platí předpoklad že $\varphi_A > \varphi_B$, pak směr vektoru intenzity pole je opačný!

KO 3.2.1.-2.

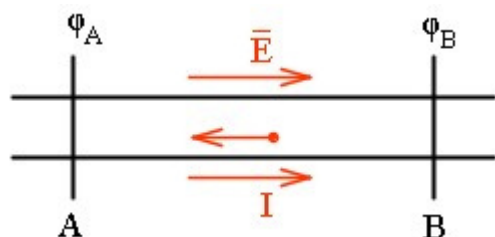
b) od místa B k A

Elektrony mají záporný náboj a pohybují se z místa nižšího potenciálu do místa s vyšším potenciálem, jinak řečeno pohybují se proti intenzitě pole. V našem případě z místa B k A. To je skutečný směr pohybu elektronů, které se účastní vedení proudu v kovovém vodiči.

KO 3.2.1.-3.

a) od A k B

Podle dohody je směr elektrického proudu definován směrem pohybu kladného náboje jak vidíte na obrázku O 3.2.1.-3.



O 3.2.1.-3

3.2.2. Elektrický proud v kovech

KO 3.2.2.-1. 1 A , odpor $R = U/I$ je konstantní

3.2.3. Elektrický odpor

KO 3.2.3.-1.

d), nezapomeňte, že ve vztahu V 3.2.3.-1 je S průřez vodiče, ne jeho průměr!

KO 3.2.3.-2. $\Delta R = R_1 \cdot \alpha (t - t_1)$

KO 3.2.3.-3. $\rho = R \cdot S / l$ Jednotka rezistivity je ohmmetr ($\Omega \cdot m$)

KO 3.2.3.-4.

Teplota vlákna je za provozu vyšší (asi 2500°C) než v okamžiku rozsvícení. S rostoucí teplotou vlákna, vzroste jeho odpor. Je-li napětí na zdroji konstantní, pak s rostoucím odporem klesá proud.

3.2.4. Práce a výkon proudu

KO 3.2.4.-1. $1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$

3.2.5. Elektrický zdroj napětí

KO 3.2.5.-1.

b) svorkové napětí

Když voltmetr zapojíme na svorky zdroje, prochází jím proud. Měříme tedy na svorkách zatíženého zdroje, zdroje ze kterého je odebírán proud. Na druhé straně je pravda, že voltmetry jsou konstruovány s velkým vnitřním odporem a tudíž proud, který je odebírán ze zdroje je velmi malý, úbytek napětí ($r.I$) na zdroji je malý a tedy rozdíl mezi naměřeným svorkovým napětím a elektromotorickým napětím je pro běžnou praxi nedůležitý.

KO 3.2.5.-2. 10Ω

KO 3.2.5.-3. 20 V

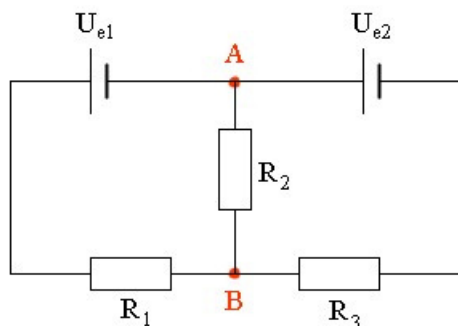
KO 3.2.5.-4. 18 V

KO 3.2.5.-5. 2 V

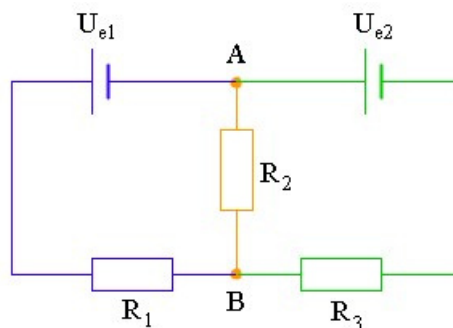
RU 3.2.5.-2. $r = 4 \Omega$, $U_e = 36 \text{ V}$

3.2.6. Kirchhoffovy zákony

KO 3.2.6.-1. Dva. Uzel A a B viz O 3.2.6.-4



obr.3.2.6.-4



obr. 3.2.6.-5

KO 3.2.6.-2. Tři. Viz O 3.2.6.-5 (modrá, zelená, žlutá)

KO 3.2.6.-3. Tři.

- 1) Uzel A, zdroj U_{e1} , rezistor R_1 , uzel B, rezistor R_2 , uzel A
- 2) Uzel A, zdroj U_{e2} , rezistor R_3 , uzel B, rezistor R_2 , uzel A
- 3) Uzel A, zdroj U_{e1} , rezistor R_1 , uzel B, rezistor R_3 , zdroj U_{e2} , uzel A

KO 3.2.6.-4. $I_1 + I_2 + I_3 = I_4$ nebo $I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$

KO 3.2.6.-5. b) $U_{e1} > U_{e2}$

KO 3.2.6.-6. $R_1.I + R_2.I + r.I = U_e$

T 3.2.6.-3. $n = 0$

KO 3.2.6.-7. a) $20\ \Omega$, b) $5\ \text{A}$, c) $5\ \text{A}$, d) na R_2 , e) $1 : 3$

T 3.2.6.-4. Dva, jsou označeny A,B

T 3.2.6.-5. Tři

KO 3.2.6.-8. a) $15/4\ \Omega$, b) $16\ \text{A}$, c) $12\ \text{A}$, d) $4\ \text{A}$ e) na obou je $60\ \text{V}$ f) $3 : 1$

KO 3.2.6.-9. $R_1, R_4, U_{e3}, R_5, R_2, U_{e1}$

3.2.7. Vedení proudu v kapalinách

KO 3.2.7.-1. kationty (+) se pohybují ke katodě (-)

KO 3.2.7.-2. anionty (-) se pohybují k anodě (+)

KO 3.2.7.-3. Ne. K disociaci molekul elektrolytu dochází účinkem vody.

KO 3.2.7.-4. b) není nutná přítomnost elektrod v elektrolytu
a) je nutné aby mezi elektrodami bylo napětí
a) katodě

KO 3.2.7.-5. a) katodě
a) na katodě
 $m = 22,36\ \text{mg}$ (podle V 3.2.7.-1)
 $m = 2,09\ \text{mg}$ (podle V 3.2.7.-1 kde $I \cdot t = Q$)

KO 3.2.7.-6. b) podle konvence je směr proudu dán pohybem kladného náboje

KO 3.2.7.-7. $U = -0,44 - (-0,76) = 0,32\ \text{V}$

KO 3.2.7.-8.

Nevím, jestli by se tomu dalo říkat galvanický článek. Pod pojmem „galvanický článek“ rozumíme zdroj elektromotorického napětí a v tomto případě je elektromotorické napětí rovno nule.

KO 3.2.7.-9. $U_e = 12,3\ \text{V}$ (protože články jsou zapojeny v sérii, napětí se sčítá)

KO 3.2.7.-10.

$r = 3,18 \cdot 10^{-2}\ \Omega$. (protože články jsou zapojeny v sérii, jejich vnitřní odpory se sčítají)

KO 3.2.7.-11.

2,5 hod. $Q = I \cdot t$ a tedy $t = Q/I$ tj. $t = 40/16 = 2,5$ hodin
 $Q = 1,44 \cdot 10^5\ \text{C}$ ($Q = 40\ \text{A} \cdot \text{h} = 40 \cdot 3600\ \text{A} \cdot \text{s} = 1,44 \cdot 10^5\ \text{C}$)

3.2.8. Elektrický proud v plynech a ve vakuu

KO 3.2.8.-1. Elektrony a ionty

KO 3.2.8.-2. Neutrální atomy nebo molekuly.

KO 3.2.8.-3. Viz. T 3.1.6.-1 $W_v = 4,15 \text{ eV} = 4,15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 6,64 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

KO 3.2.8.-4.

Ne Diodou (jak se této elektronce říká) bude procházet proud jen tehdy, když katoda (žhavená elektroda) je připojena k zápornému pólu zdroje B. V opačném případě proud neprochází (anoda bude elektrony odpuzovat) Dioda tedy působí jako usměrňovač proudu.

KO 3.2.8.-5.

Plamen způsobuje zahřívání vzduchu a způsobuje jeho ionizaci. Vzduch se stává vodivý.

KO 3.2.8.-6.

Elektrody zapalovacích svíček jsou vzdáleny řádově desetiny mm. Pokud je mezi elektrodami správné napětí (až 20 kV), probíhá mezi nimi jiskrový výboj.

3.2.9. Vedení proudu v polovodičích

KO 3.2.9.-1. C je kov, T není žádný z uvedených typů, S je polovodič

KO 3.2.9.-2. Ano, ovšem pokud dostane zvnějšku energii $E = E_2 - E_1$.

KO 3.2.9.-3.

Ne. Je-li hladina E_2 plně obsazena, nemůže na ni přejít žádný další elektron. Odporovalo by to Pauliho principu.

KO 3.2.9.-4.

Je kvantována. Energetický pás se skládá z velmi velkého počtu velmi blízkých energetických hladin energie. Počet těchto hladin v pásu je roven počtu atomů, které obsahuje mřížka zkoumaného vzorku. Jednotlivé energie uvnitř pásu jsou velmi těsně u sebe.

KO 3.2.9.-5. V pásu C

KO 3.2.9.-6.

$6,8 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Hustota děr ve valenčním pásu a elektronů ve vodivostním pásu je stejná.

KO 3.2.9.-7.

b) kladné ionty. Neutrální atom křemíku má 14 elektronů. Deset elektronů je pevně vázáno k jádru. Zbývající čtyři se podílejí na vytvoření kovalentní vazby. Symbol (Si) označuje jádro a deset k němu pevně vázaných elektronů – tedy kladný iont. Tyto kladné ionty zaujímají v mřížce pevnou polohu a vedení proudu se neúčastní.

KO 3.2.9.-8.

a) 10^{16} děr, b) $10^{16} + 10^{22}$ za předpokladu, že téměř každý atom fosforu daruje svůj nadbytečný elektron vodivostnímu pásu.

KO 3.2.9.-9. a) elektronovou. Bude-li více hliníku, půjde o vodivost děrovou

3.3. Magnetické pole a jeho vlastnosti

3.3.1. Definice magnetické indukce

KO 3.3.1.-1. $F = 0 \text{ N}$

KO 3.3.1.-2. $F = 0 \text{ N}$

KO 3.3.1.-3. $\alpha = 0^\circ$ resp. $\alpha = 180^\circ$ a proto $F = 0 \text{ N}$

KO 3.3.1.-4.

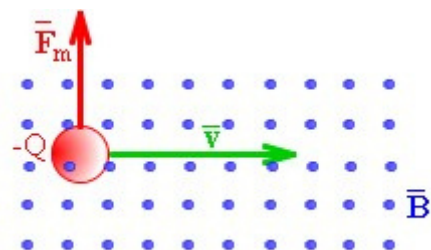
Podle vztahu V 3.3.1.-1 je síla F maximální pro $\alpha = 90^\circ$, tedy vektor rychlosti částice je kolmý na vektor magnetické indukce.

KO 3.3.1.-5. u druhého

KO 3.3.1.-6. O 3.3.1.-5



KO 3.3.1.-7. O 3.3.1.-7



3.3.2. Indukční tok

KO 3.3.2.-1. a) vcházejí

KO 3.3.2.-2. b) vycházejí z místa, které nazýváme jižním geomagnetickým pólem

KO 3.3.2.-3. 0°

KO 3.3.2.-4.

Protože $\cos 0^\circ = 1$, $\Phi_m = B \cdot S$. V tomto případě je indukční tok plochou S maximální.

KO 3.3.2.-5. Protože $\alpha = 90^\circ$ a $\cos 90^\circ = 0$, indukční tok $\Phi_m = 0$ Wb.

KO 3.3.2.-6.

$\Phi_m = 0,5$ Wb. α , tj. úhel, který svírá vektor $\mathbf{B}$ s vektorem normály (tj.s kolmicí k ploše) $\mathbf{n}$ je 0° a $\cos 0^\circ = 1$.

KO 3.3.2.-7.

$\Phi_m = 0$ Wb. α , tj. úhel, který svírá vektor $\mathbf{B}$ s vektorem normály (tj.s kolmicí k ploše) $\mathbf{n}$ je 90° a $\cos 90^\circ = 0$.

3.3.3. Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli

RU 3.3.3.-2.

- $v = (2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 / 9,1 \cdot 10^{-31})^{0,5}$ $v = 6 \cdot 10^6$ m/s
- Podle V 3.3.3.-1 platí $m \cdot v^2 / R = Q \cdot v \cdot B$
- Podle V 3.3.3.-2 $R = m \cdot v / (Q \cdot B)$
- $R = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 6 \cdot 10^6 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-4}) = 0,34$ m

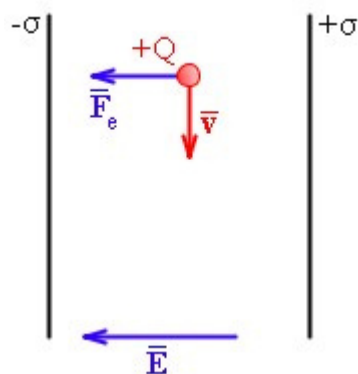
Elektrony se budou pohybovat po kružnici poloměru 0,34 m.

- $T = 2 \cdot \pi \cdot 0,34 / 6 \cdot 10^6 = 3,6 \cdot 10^{-7}$ s

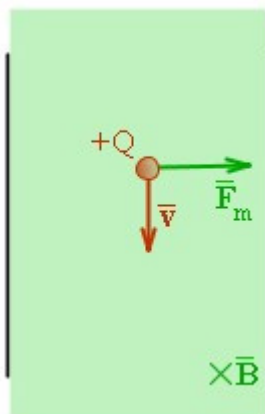
Perioda, tedy doba potřebná pro jeden oběh, je $T = 3,6 \cdot 10^{-7}$ s.

RU 3.3.3.-3.

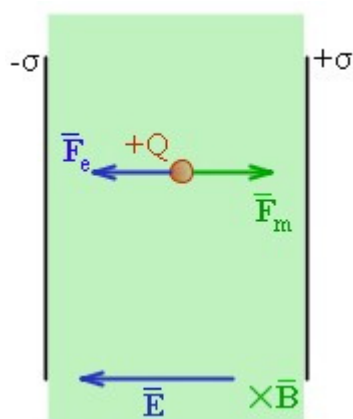
- Správný směr vidíte na následujícím obrázku. Trajektorií pohybu protonu bude parabola (resp.její část).



- $F_e = E \cdot Q$
- Správný směr vidíte na následujícím obrázku. Levou ruku položte na obrázek dlaní nahoru (indukční čáry vstupují do dlaně), natažené prsty jsou ve směru $\mathbf{v}$ a vztyčený palec ukazuje směr síly $\mathbf{F}_m$ na kladný proton. Trajektorií pohybu protonu bude kružnice.



- $F_m = Q.v.B$
- Dvě, F_e a F_m .
- Správné řešení vidíte na obrázku.



- $E.Q = Q.v.B$
- $v = E/B$
- a) na kladné desce
- b) na záporné desce

3.3.4. Síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli

KO 3.3.4.-1. c) zůstane stejná

KO 3.3.4.-2. b) bude opačný, tj. ←

KO 3.3.4.-3.

Požijeme Flemingovo pravidlo levé ruky. Natažené prsty ve směru I , vztyčený palec ve směru síly, indukce vstupuje do dlaně, tj. má směr $-y$

RU 3.3.4.-1.

- b) doleva, směrem od zdroje ←
- Buď změnit směr proudu, nebo změnit směr vektoru indukce $\mathbf{B}$
- Pohyb vodiče XY způsobuje síla $\mathbf{F}_m$, která má konstantní směr i velikost. Vodič se bude pohybovat přímočarým rovnoměrně zrychleným pohybem.

- Protože (podle Newtonova zákona síly) $F = m \cdot a$, platí $B \cdot I \cdot d = m \cdot a$ a vodič se pohybuje se zrychlením : $a = B \cdot I \cdot d / m$
- Pro velikost rychlosti rovnoměrně zrychleného pohybu s nulovou počáteční rychlostí platí $v = a \cdot t$ a po dosazení zrychlení dostaneme $v = \frac{B \cdot I \cdot d}{m} \cdot t$

T 3.3.4.-2.

- Indukce $\mathbf{B}$ svírá s vodičem úhel $\alpha = 0^\circ$ (resp. 180°), $\sin 0^\circ = \sin 180^\circ = 0$. Podle V 3.3.4.-2 je $F_m(\text{PR}) = F_m(\text{ST}) = 0 \text{ N}$.

3.4. Vznik magnetického pole

3.4.1. Magnetické pole elektrického proudu

T 3.4.1.-3.

Na tuhou podložku (papír) byly nasypány železné piliny. Dlouhý přímý vodič je kolmý na podložku. Pokud vodičem prochází proud, uspořádají se piliny do tvaru soustředných kružnic kolem vodiče. Prochází-li vodičem proud, vzniká kolem vodiče magnetické pole. Drobné železné piliny se v tomto poli magnetují a uspořádají se ve směru tečny k magnetickým indukčním čarám tohoto pole.

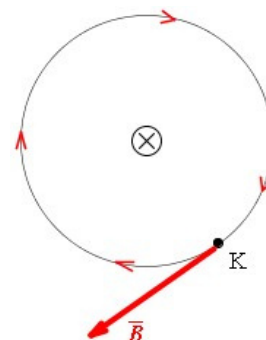
KO 3.4.1.-1.

Indukční čára bude orientovaná opačně (tj. v našem případě proti směru hodinových ručiček). Velikost indukce B bude stejná, její směr bude opačný.

KO 3.4.1.-2.

Sestrojíme si indukční čáru - kružnici, která má střed ve vodiči a prochází bodem K. Indukční čára je orientovaná křivka. Orientaci určíme pravidlem pravé ruky (palec jde do obrázku). Sestrojíme tečnu k indukční kružnici ve zkoumaném bodě K. Vektor indukce B leží na této tečně a je orientován ve shodě s orientací indukční kružnice jak vidíte na O 3.4.1.-4b.

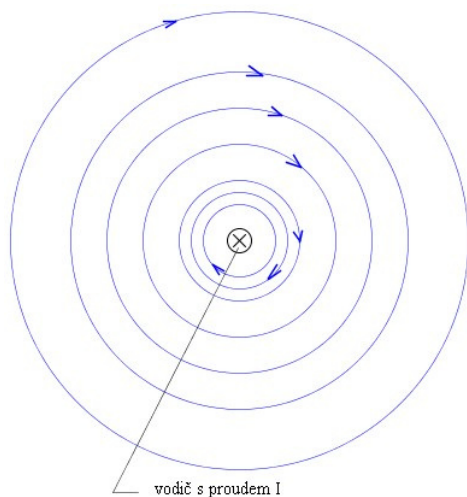
O 3.4.1.-4b



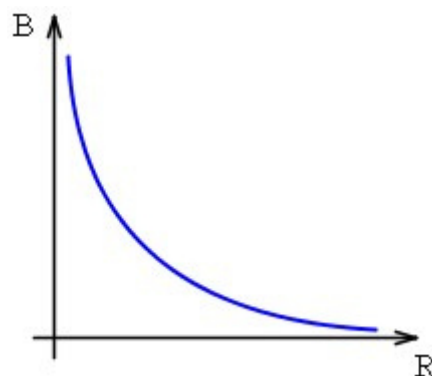
KO 3.4.1.-3. Správné řešení je a), d)

KO 3.4.1.-4.

Chybu udělal student v tom, že má stejnou vzdálenost mezi magnetickými indukčními čarami. Tato vzdálenost s rostoucí vzdáleností od vodiče roste tak, jak klesá velikost B v závislosti na R . Jinými slovy: s rostoucí vzdáleností R od vodiče, **klesá velikost indukce B** jeho magnetického pole a tedy **klesá i hustota indukčních čar**. Správný obrázek vidíte na obrázku O 3.4.1.-7.



O 3.4.1.-7



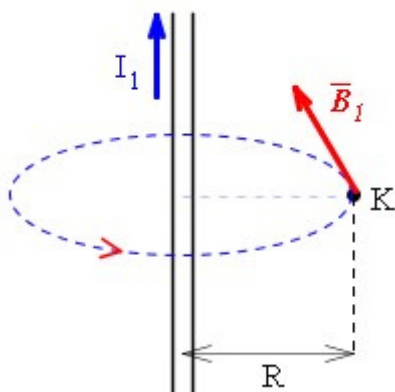
O 3.4.1.-8b

KO 4.2.1.-5. b) Pole je **nehomogenní**. Indukce **B** nemá konstantní ani velikost ani směr.

RU 3.4.1.-1. Jde o funkci $y = \text{konst.}/x$, grafem je jedna větev hyperboly. Obr. 3.4.1.-8b.

T 3.4.1.-4

- Podle V 3.4.1.-1 je $B_1 = \mu_0 I_1 / (2\pi R)$
- Palec pravé ruky ve směru proudu, zahnuté prsty ukazují směr indukčních čar. Indukce B_1 je v bodě K kolmá na rovinu obrázku a mívá do obr. O 3.4.1.-9b.



O 3.4.1.-9b.

- Podle V 3.3.4.-2 ($\alpha = 90^\circ$) má hledaná síla velikost $F_m = B_1 I_2 L$
- Podle Flemingova pravidla levé ruky: indukce B_1 mívá do dlaně levé ruky, prsty ukazují směr proudu, vztyčený palec ukazuje směr magnetické síly F_m . Řešení vidíte na následujícím obrázku O 3.4.1.-9c.

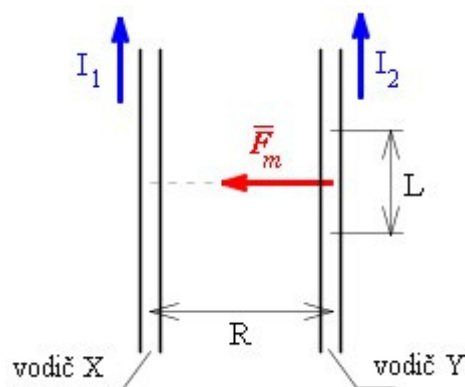
KO 3.4.1.-6.

Velikost indukce B_2 magnetického pole vodiče Y ve vzdálenosti R je

podle V 3.4.1.-1 je $B_2 = \mu_0 I_2 / (2\pi R)$

KO 3.4.1.-7.

Je kolmý na rovinu obrázku a mívá z obrázku.



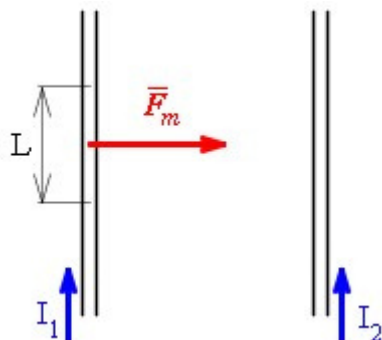
O 3.4.1.-9c

KO 3.4.1.-8.

Podle V 3.3.4.-2 ($\alpha = 90^\circ$) má hledaná síla velikost $F_m = B_2 I_1 L$

Pokud dosadíme za B_2 , dostaneme stejný výsledek, tj. V 3.4.1.-2

KO 3.4.1.-9. Řešení vidíte na O 3.4.1.-10b



KO 3.4.1.-10. $F_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$

KO 3.4.1.-11.

Pokud by vodiči procházeli proud $I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$, působily by na sebe síly velikosti

$F_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

V případě, že $I_1 = I_2 = 3 \text{ A}$, bude síla 9krát větší (viz V 3.4.1.-2), tedy

$F_m = 18 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

Přitahovat se budou v případě, že směr proudu v obou vodičích je souhlasný.

KO 3.4.1.-12. c) 2krát větší, podle V 3.4.1.-4

KO 3.4.1.-13.

Správně je d). Součin $N \cdot I$ je u všech cívek 500 ampérzávitů a délku mají taky stejnou.

3.4.2. Magnetické pole látek

KO 3.4.2.-1. $\mu_r = 500$

KO 3.4.2.-2. A, F, nijak – další růst proudu již nemá vliv na indukci B' jádra.

KO 3.4.2.-3. A, F

KO 3.4.2.-4. A, F

KO 3.4.2.-5. Vektory indukce B' magnetického pole jádra jsou opačně orientované.

KO 3.4.2.-6. D a G

KO 3.4.2.-7. E a H

KO 3.4.2.-8. D, G

KO 3.4.2.-9. E, H

KO 3.4.2.-10. a) tvrdé magnetické materiály

KO 3.4.2.-11.

b) měkké magnetické materiály, u kterých je při nulovém magnetizujícím proudu malá remanentní magnetická indukce.

KO 3.4.2.-12.

Do série s cívkou elektromagnetu zapojíme reostat. Plynulou změnou odporu měníme magnetizující proud v cívce, a tím i nosnou sílu.

KO 3.4.2.-13.

Změnou směru magnetizujícího proudu v cívce elektromagnetu.

3.5. Elektromagnetická indukce

3.5.1. Faradayův zákon elektromagnetické indukce.

KO 3.5.1.-1.

Bude. Pohybem magnetu se mění indukce B magnetického pole, v němž se cívka nachází, v obvodu se indukuje napětí a prochází jím indukovaný proud.

KO 3.5.1.-2. a),c)

KO 3.5.1.-3. 2 Wb/s

KO 3.5.1.-4.

Nebude. Konstantní proud v primárním obvodu budí v okolí primární cívky časově neproměnné (stacionární) magnetické pole, a tedy indukční tok závitů sekundární cívky je konstantní ($\Phi_m = \text{konst.}$ a tedy $\Delta \Phi_m = 0$ Wb a tedy U_i na sekundární cívkce je nulové).

KO 3.5.1.-5.

Bude, zapínání a vypínání klíče způsobuje změnu proudu v primární cívkce a tím změnu magnetické indukce B . Indukční tok závitů sekundární cívky už nebude konstantní.

KO 3.5.1.-6.

Bude, viz. KO 3.5.1.-5. Změna proudu v primární obvodu způsobuje změnu indukčního toku v primární i sekundární cívkce.

KO 3.5.1.-7.

Bude, mění se indukce B magnetického pole primární cívky, ve kterém se sekundární cívka nachází. Při určité poloze cívek tomu tak ale nemusí být.

KO 3.5.1.-8. a), c) indukční tok je konstantní, $\Delta \Phi_m = 0$ Wb.

KO 3.5.1.-9.

b) Časové intervaly jednotlivých úseků grafu jsou stejné. Největší změna indukčního toku v daném časovém intervalu je v úseku 2.

KO 3.5.1.-10. d) e) U_i je zde stejné a menší než v úseku 2

T 3.5.1.-6

Obvodem prochází proud ale nevidíte v něm zdroj.

RU 3.5.1.-2.

1/ c) indukční čáry protínají celou plochu závitů, $\Phi_m(\text{max}) = B \cdot S$

2/ a),e) pokud je celý závit mimo pole je $\Phi_m(\text{min}) = 0$ Wb

3/ b) pokud závit vstupuje do pole, zvětšuje se plocha, kterou protíná indukční tok

4/ d) pokud závit vystupuje z pole, zmenšuje se plocha, kterou protíná indukční tok

5/ a),c),e) v těchto případech se nemění velikost indukčního toku (je buď maximální, nebo roven nule)

6/ b),d) tj. v těch případech, kdy dochází ke změně indukčního toku

7/ **d)** závit vystupuje z pole, Φ_m klesá, vektory $\mathbf{B}_i$ a $\mathbf{B}$ budou souhlasně orientovány, tj $\mathbf{B}_i$ má směr do obrázku. Palec pravé ruky míří do obrázku, zahnuté prsty ukazují směr indukovaného proudu.

8/ **b)** závit vstupuje do pole, Φ_m roste, vektory $\mathbf{B}_i$ a $\mathbf{B}$ budou opačně orientovány, tj, vektor $\mathbf{B}_i$ míří z obrázku.

3.5.2. Vlastní a vzájemná indukce

RU 3.5.2.-1.

- Podle V 3.4.1.-4 je $B = \mu_0 \cdot N \cdot I / l$
- Podle V 3.3.2.-1 je magnetický indukční tok $\Phi_m = B \cdot S \cos \alpha$, pro $\alpha = 0^\circ$ je $\cos 0^\circ = 1$ a $\Phi_m = B \cdot S$
- $L = N \cdot \Phi_m / I = N \cdot B \cdot S / I$. Dosadíte-li za B a výraz upravíte dostanete $L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot S / l$

KO 3.5.2.-1. b) druhá cívka má 2krát větší indukčnost

KO 3.5.2.-2. Indukčnost bude $L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S / l$ tedy μ_r krát větší

KO 3.5.2.-3.

Pokud je magnetický indukční tok cívkou konstantní, cívkou neprochází proud. Porucha v materiálu změní jeho magnetické vlastnosti, a tím se změní magnetický indukční tok procházející cívkou defektoskopu a v cívkce se indukuje elektromotorické napětí.

KO 3.5.2.-4. c) $\Delta I / \Delta t = 2 \text{ A/s}$ a je v obou případech stejné

KO 3.5.2.-5. Rychlost změny proudu $\Delta I / \Delta t$ je 3 A/s $U_i = 0,15 \text{ V}$

KO 3.5.2.-6. a) $\Delta I / \Delta t = 3 \text{ A/s}$

KO 3.5.2.-7. b) podle V 3.5.2.-4

KO 3.5.2.-8. $L = 1 \text{ H}$. Takto se definuje jednotka henry.

KO 3.5.2.-9.

Indukčnost je vlastnost celého elektrického obvodu, tj.všech prvků, které jsou v něm zapojeny. Indukčnost např. vodičů je ale velmi malá a proto se jí nezabýváme.

3.5.3. Vznik střídavého proudu

KO 3.5.3.-1.

a) $U_m = 0,5 \text{ V}$ b) $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$ c) $\omega \cdot t = 2\pi \cdot t \text{ rad}$ d) $f = \omega / 2\pi$ tj. 1 Hz e) $T = 1/f$ tj. 1 s

KO 3.5.3.-2. $u = 2 \sin 20\pi \cdot t$

KO 3.5.3.-3.

t (s)	$\omega.t$ (rad)	$\sin \omega.t$	u (V)
0	0	0	0
1/3	$\pi/6$	0,5	1
1	$\pi/2$	1	2
5/3	$5\pi/6$	1/2	1
2	π	0	0
3	$3\pi/2$	-1	-2

KO 3.5.3.-4. a) A,C,E b) B,D c) C,E d) 2krát

KO 3.5.3.-5. 100krát

KO 3.5.3.-6.

t (s)	$\omega.t$ (rad)	$\sin \omega.t$	u (V)	i (A)
0	0	0	0	0
1/3	$\pi/6$	0,5	1	1/3
1	$\pi/2$	1	2	2/3
5/3	$5\pi/6$	1/2	1	1/3
2	π	0	0	0
3	$3\pi/2$	-1	-2	-2/3

KO 3.5.3.-7.

Na sítnici lidského oka se vjem zachovává po dobu 0,04 s. To znamená, že polovina periody musí být 0,04 s, $T = 0,08\text{ s}$ a frekvence $f = 100/8\text{ Hz} \sim 12 - 13\text{ Hz}$. Změny o větší frekvenci jsou vnímány jako plynulé.

T 3.5.3.-4

Žádná z uvedených možností není správná. Hodnota napětí 230 V je sice efektivní napětí, ale efektivní napětí není průměrné napětí.

T 3.5.3.-5.

Správná odpověď je a). V RU 3.5.3.-2. jsme dokázali, že pokud je ke střídavému zdroji zapojen pouze rezistor, proud a napětí jsou ve fázi, tedy $\varphi = 0$, činný výkon je v tomto případě maximální.

v případě b) a c) je fázový posun vždy nenulový a je způsoben přítomností kondenzátoru nebo cívky.

KO 3.5.3.-8.

správné řešení: a), b), d), e), tj. v případě, že účinník je roven jedné.

V případech c), f) je $\cos \varphi = 0$ činný výkon $P = 0$, tj. pro $\varphi = 90^\circ$

KO 3.5.3.-9. Ano