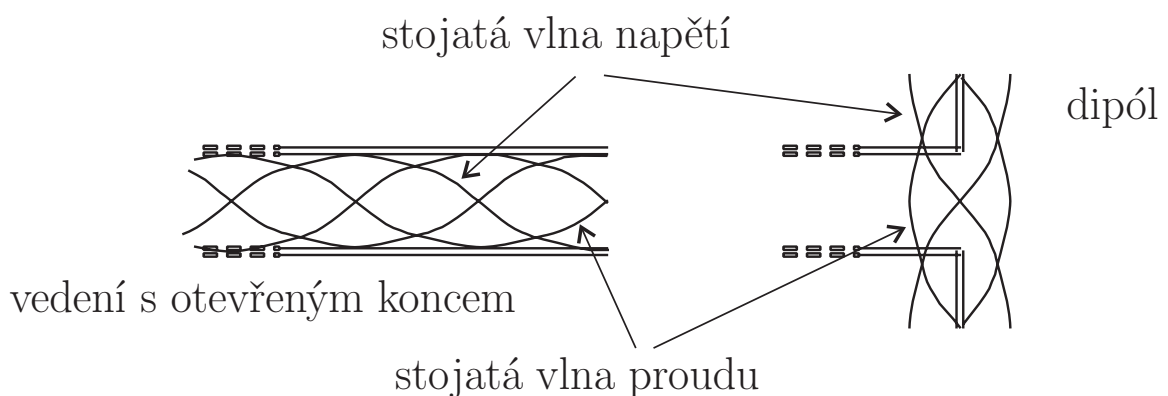


## Elektromagnetické vlny

Elektromagnetická vlna, šíření, rušení.

Princip vyslání elektromagnetické vlny z elektronického systému – vysílače, do vnějšího prostoru popíšeme velmi zjednodušeně. Vrátime se k dlouhému vedení a připomeneme, že vedení je soustavou s rozloženou kapacitou a indukčností podél vodičů. Připomeneme, že jsme hovořili o šíření vlny podél vedení a o odrazech na koncích vedení. Pokud se na začátku vedení připojí zdroj signálu, který generuje sinusový signál a „ve správných okamžicích podporuje“ rozkmit odražených vln, pak na vedení vznikne tzv. stojaté vlnění. Když vodiče takového vedení vzájemně vzdálíme, vytvoříme vysílací anténu a postupující vlna vyzáří energii do prostoru. Z uvedeného plyne, že rozměr takové antény bude muset respektovat kmitočet vyzařované vlny, protože při dané rychlosti šíření vlny bude fáze odražené vlny záviset na kmitočtu a délce vedení.



Obrázek 10.1: Dipól

Na obrázku je jedna z možností, jak vyslat elektromagnetickou vlnu do prostoru. Bude-li potom v místě, kam se vlna prostorem dostane, umístěn dipól, nebo jiné uspořádání schopné

---

vlnu zachytit, získáme elektrický signál, který po zesílení bude mít vlastnosti signálu, kterým byla vysílací anténa buzena.

Rychlost šíření elektromagnetických vln v prostoru závisí na prostředí. Ve vakuu (a přibližně i ve vzduchu) lze počítat s rychlostí  $v = 3 \cdot 10^8$  m/s. Délka vlny  $\lambda$  souvisí s jejím kmitočtem  $f$  podle vztahu

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Do prostoru lze vyzářit elektromagnetické vlny ve značném rozsahu vlnových délek, resp. frekvencí. Bude tomu jistě odpovídat i velký počet typů zářičů – antén. Vlny o různých délkách budou rovněž vykazovat odlišné chování při svém šíření prostorem, ale i při šíření vedením. V následující tabulce je uveden přehled kmitočtů a vlnových délek různě používaných elektromagnetických vln.

	frekvence	vlnová délka
extrémně dlouhé vlny	0,3 - 3 kHz	1000 - 100 km
velmi dlouhé vlny	3 - 30 kHz	100 - 10 km
dlouhé vlny (DV)	30 - 300 kHz	10 - 1 km
střední vlny (SV)	0,3 - 3 MHz	1 - 0,1 km
krátké vlny (KV)	3 - 30 MHz	100 - 10 m
velmi krátké vlny (VKV)	30 - 300 MHz	10 - 1 m
ultra krátké vlny (UKV)	0,3 - 3 GHz	1 - 0,1 m
mikrovlny	3 - 30 GHz	100 - 10 mm
mikrovlny	30 - 300 GHz	10 - 1 mm
infračervené záření	$10^{10}$ - $10^{14}$ Hz	1 mm - 1 $\mu$ m
viditelné záření	$10^{14}$ Hz	400 - 700 nm
ultrafialové záření	$10^{14}$ - $10^{16}$ Hz	400 - 10 nm
rentgenové záření	$10^{16}$ - $10^{19}$ Hz	10 - 0,1 nm
gamma záření	$10^{19}$ - $10^{24}$ Hz	$10^{-10}$ - $10^{-14}$ m

	anglické označení
extrémně dlouhé vlny	Extremely Low Frequency (ELF)
velmi dlouhé vlny	Very Low Frequency (VLF)
dlouhé vlny (DV)	Low Frequency (LF)
střední vlny (SV)	Medium Frequency (MF)
krátké vlny (KV)	High Frequency (HF)
velmi krátké vlny (VKV)	Very High Frequency (VHF)
ultra krátké vlny (UKV)	Ultra High Frequency (UHF)
mikrovlny	Super High Frequency (SHF)
mikrovlny	Extremely High Frequency (EHF)
infračervené záření	Infra Red (IR)
viditelné záření	Visible (VIS)
ultrafialové záření	Ultra Violet (UV)
rentgenové záření	X-Rays
gama záření	Gamma Rays

Elektromagnetická vlna má dvě navzájem neoddělitelné složky. Elektrickou charakterizuje vektor intenzity elektrického pole a magnetickou vektor magnetické indukce. Tyto vektory jsou navzájem kolmé, mají souhlasnou fázi a jejich kmity probíhají kolmo ke směru, kterým se vlna šíří.

Elektromagnetické vlny jsou ve fyzice charakterizovány vlastnostmi vlnovými a kvantovými: Za vlnové vlastnosti pokládáme odraz, lom, ohyb, interferenci a polarizaci vln. Za kvantovou vlastnost považujeme např. představu fotonu, který vyvolává fotoelektrické jevy.

Využití různých vlnových délek je většinou vázáno na vlastnosti vln z hlediska možnosti jejich generování (vysílání), vlastností jejich šíření, z hlediska možnosti jejich zachycení a z hlediska jejich případných účinků.

---

Za **radiové vlny** pokládáme vlny od délky 1000 m do délky 0,1 m, (od DV do UKV), na kterých se šíří, kromě jiných služeb i pozemní rozhlas a televize. Pásmo mikrovln  $3 \div 300$  GHz jsou rovněž používána pro veřejnou rozhlasovou službu, avšak jen ve velmi úzce vymezených kmitočtových pásmech.

Radiové vlny jsou generovány v radiových vysílačích, které v elektronických obvodech vytvoří signál potřebné frekvence, namodulují na tento signál přenášenou informaci a signál s potřebným výkonem vyšlou pomocí vysílací antény.

Dlouhé vlny se šíří do velkých vzdáleností podél zemského povrchu.

Krátké vlny se odrážejí od ionosféry (začíná ve výšce  $60 \div 80$  km nad zemským povrchem, obsahuje určité množství molekul vzduchu rozštěpených na ionty a volné elektrony, takže se chová podobně jako vodivá plocha. Stav ionosféry se mění vlivem slunečního záření, takže se mění i podmínky šíření krátkých vln v různých denních a nočních dobách). Krátké vlny mají díky ionosferickým odrazům velký dosah.

Velmi krátké vlny se používají k přenosu televizního signálu a zahrnují též pásmo rozhlasového vysílání FM. Velmi krátké a ultra krátké vlny vyžadují přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem, a pokud jsou zachyceny mimo viditelnost, jedná se o vlny odražené od překážek s velkým rizikem interferencí mezi různě odraženými vlnami.

V centru zájmu současných komunikačních technologií je pásmo na horním okraji UKV a pásmo mikrovln. Ke kmitočtům některých služeb z této oblasti se ještě vrátíme.

**Mikrovlny** v pásmu mezi rádiovými vlnami a infračerveným zářením plní kromě komunikačních rolí též roli tepelného zdroje. Mikrovlnné záření může rozkmitávat molekuly vody a organických struktur, čehož se využívá např. u mikrovlnné

trouby nebo v termoterapii v lékařství (mikrovlnná destrukce nežádoucích tkání).

Kratší vlnové délky jsou svázány s tak vysokými kmitočty, že k jejich generaci nelze vytvořit elektronický obvod, který by generoval elektrický signál příslušné frekvence. Zdrojem vln jsou fyzikální pochody v různých materiálech a technologických strukturách, a to zcela běžných (ohřáté železo) i vysoce speciálních (polovodičový laser).

**Infračervené IR (infrared) záření** nebo tepelné záření. Infračervené záření je podstatou šíření tepla zářením, a to i vakuem (např. i povrch Země je zahříván infračerveným slunečním zářením). Zdrojem IR záření je každé těleso, které má teplotu vyšší než je absolutní nula. Původem IR záření jsou změny elektromagnetického pole vyvolané pohybem molekul. Pohyb molekul závisí na teplotě. Proto tělesa zahřátá na vyšší teplotu jsou původcem silnějšího IR záření než tělesa chladnější.

IR záření není viditelné okem, proniká mlhou a znečištěným ovzduším, pomocí vhodných přístrojů (infrakamer) je lze zachytit, ačkoli ho ve tmě okem nevnímáme. Při pohlcování IR záření vzniká tepelná odezva - energie elektromagnetického vlnění se mění na teplo v ozářeném tělese.

Praktické aplikace zahrnují: Vidění v mlze. Infralokátory, brýle pro noční vidění (lze pozorovat v naprosté tmě lidské tělo, které vyzařuje IR záření), videokamery pro noční natáčení, kdy jako osvětlení slouží IR zářiče, okem vnímáme tmu, ale kamera zachytí osvětlené předměty. V dálkových ovladačích neruší radiový signál a zároveň ho nevnímáme. Infrazářiče slouží k vytápění.

**Viditelné světlo** může být složeno z řady vln o různé vlnové délce. Jde o světlo chromatické, např. bílé světlo může

---

být složeno ze tří základních barev, ale také může mít téměř spojité spektrum s velmi velkým počtem složek. V případě, že jde o světlo monochromatické, pak je záření nesenou jednou vlnovou délkou. Typickým zdrojem monochromatického světla je laser.

U světla rozeznáváme jeho intenzitu a barvu, která závisí na vlnových délkách obsažených ve světle. Světelné spektrum je část elektromagnetického spektra, ve kterém je zobrazena závislost barev světla na vlnových délkách: střední vlnové délky se uvádějí takto: červená (650 nm), oranžová (600 nm), žlutá (580 nm), zelená (525 nm), modrá (450 nm), fialová (400 nm)

**Ultrafialové záření:** Zdrojem jsou tělesa zahřátá na velmi vysokou teplotu: Slunce, výbojky, elektrický oblouk (sváření). Způsobuje zhnědnutí kůže a produkci vitamínu D, ve vyšších dávkách rakovinu kůže, ničí mikroorganismy. Vyvolává luminiscenci (při dopadu na luminofory se mění na viditelné světlo), je pohlcováno obyčejným sklem.

**Rentgenové záření** (paprsky X). Rentgenové záření vzniká změnami elektromagnetického pole v atomovém obalu, což lze vyvolat ve vakuové elektronce bombardováním kovového povrchu svazkem elektronů. Je pohlcováno v závislosti na protonovém čísle a v závislosti na tloušťce látky. To je využito v lékařské rentgenologii a v defektoskopii materiálů.

**Záření  $\gamma$ :** Zdrojem vlnění jsou změny elektromagnetického pole při jaderných reakcích. Podobně jako rentgenové záření je pohlcováno podle struktury - používá se v defektoskopii. Způsobuje genetické změny, nemoc z ozáření (po genetických změnách buněk může dojít k rakovinnému bujení).

Uvedme některé kmitočty a kmitočtová pásma využívaná v různých aplikacích a službách:

- Pozemní a kabelová televize –  $54 \div 806$  MHz
- Satelitní televize – pásmo 12 GHz
- Bluetooth –  $2,4 \div 2,48$  GHz
- WI-FI – pásma 2,4 a 5 GHz
- GPS – satelitní navigace – 1227,6 MHz
- GSM – mobilní telefony – 900 MHz a 1800 MHz (Systém NMT – 450 MHz)
- rádiem řízené modely – legální pásmo pro všechny modely je 40 MHz, jen pro letecké modely je 35 MHz.
- civilní pásmo – 27 MHz
- ovládání zámků a pod. – 434 MHz
- amatérská pásma (radioamatéři je rozlišují podle vlnových délek) – 160 m – 1,5 MHz, 80 m – 3,5 MHz, 40 m – 7 MHz, 20 m – 14 MHz, 15 m – 21 MHz, 10 m – 28 MHz 2 m – 144 MHz, 70 cm – 433 MHz

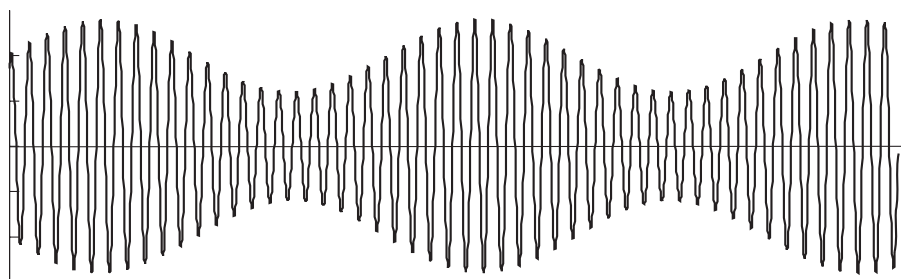


---

## Modulace

Předchozí výklad se soustředil na vytvoření a vyslání vlny o určité vlnové délce, resp. vlny s určitým kmitočtem. Lze dokázat, že trvale vysílaná vlna s konstantním kmitočtem a amplitudou nepřenáší informace (jedinou informací, kterou nese, je informace o jejím kmitočtu a rozkmitu). Abychom přenesli např. hlasovou informaci, musíme mít možnost na stranu příjemce přenést signál s kmitočtem měnícím se v intervalu nejméně  $300 \div 3400$  Hz. To jsou však kmitočty, které nejsou vhodné pro šíření elektromagnetickými vlnami. Proto se kmitočet např. krátkých vln použije jako tzv. nosná vlna a kmitočet akustického signálu se na nosnou vlnu namoduluje. Otázkou je, jak lze nosnou vlnu k takovému přenosu použít, tedy jak lze realizovat zmíněnou modulaci. Uvedeme nejprve metodu typickou pro spojitě se měnící signály. Pak se věnujeme metodám používaným pro digitální signály.

**Amplitudová modulace – AM** spočívá v řízení amplitudy nosné vlny okamžitými hodnotami modulačního signálu. Takové ovlivnění nosné vlny konstantním kmitočtem ukazuje obrázek.



Obrázek 10.2: Modulovaná nosná vlna

Matematicky lze tento proces popsat následujícím vztahem

$$y = A_n(1 + m \sin(\omega_m t)) \cdot \sin(\omega_n t),$$

kde  $y$  je signál vedený do antény,  $m$  je hloubka modulace –  $m = A_m/A_n$ , kdy  $A_m$  je amplituda modulačního signálu a  $A_n$



je amplituda nosného signálu,  $\omega_m$  je kmitočet modulačního signálu a  $\omega_n$  je kmitočet nosné vlny.

Po úpravě goniometrickými vzorci dostaneme

$$y = A_n \left[ \sin(\omega_n t) + \frac{m}{2} \cos[(\omega_n - \omega_m)t] - \frac{m}{2} \cos[(\omega_n + \omega_m)t] \right].$$

Uvedený vzorec ukazuje, že vysílaný signál, má-li nést nějakou informaci (např. uloženou v měnícím se kmitočtu modulačního signálu), musí být přenášen nikoli jako signál s jediným kmitočtem, ale vysílač musí vyslat a přijímač musí zpracovat kmitočty v určitém kmitočtovém pásmu. U amplitudové modulace jde o pásmo  $\omega_n \pm \omega_{mmax}$ , kde  $\omega_{mmax}$  je maximální kmitočet modulačního signálu. Principů, které lze použít pro modulaci nosného kmitočtu, je velké množství a pro všechny platí, že k přenosu informace si vyžádají určité frekvenční pásmo soustředěné kolem nosného kmitočtu. Zmíníme se jak o principech používaných pro spojitě signály, tak o principech používaných pro modulaci nosných vln signály digitálními.

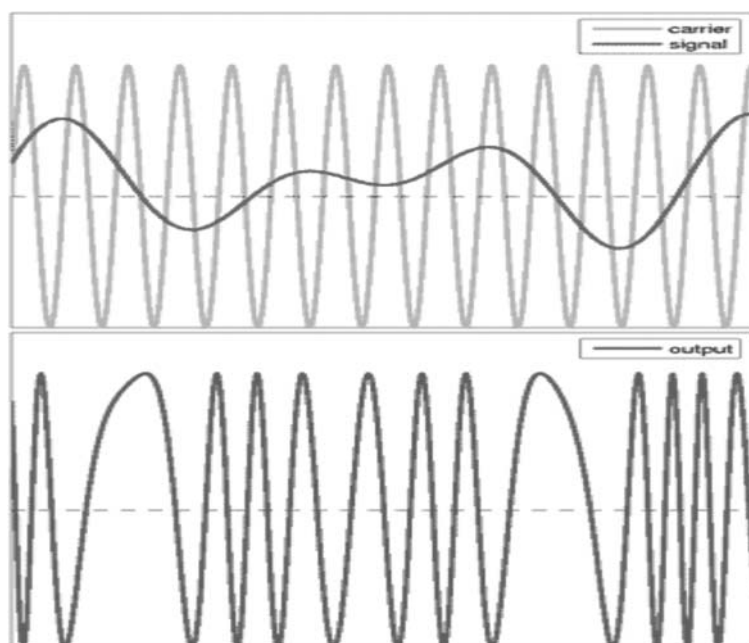
**Kmitočtová (frekvenční) modulace – FM** spočívá v řízení kmitočtu nosné vlny okamžitými hodnotami modulačního signálu. Matematicky je kmitočtová modulace popsána vztahem

$$y = A_n \sin(\omega_n t + m_f \sin \omega_m t),$$

kde  $m_f$  je index kmitočtové modulace, který určuje jak velkou změnu kmitočtu nosné vlny vyvolá rozkmit modulačního signálu. Pro určení šířky pásma již nevystačíme s jednoduchými trigonometrickými vzorci, výpočet by bylo nutno založit na rozvoji sinu do trigonometrické řady. Potřebná šířka pásma je vždy větší než u amplitudové modulace. Výhodou frekvenční modulace je významně vyšší odolnost přenášeného signálu proti rušení.

---

**Fázová (úhlová) modulace – PM** spočívá v řízení fázových posuvů v kmitočtu nosné vlny, a to okamžitými hodnotami modulačního signálu. Matematicky je fázová modulace popsána podobným vztahem jako frekvenční modulace. Rozdíl v chování obou modulací je v tom, že u frekvenční modulace se po delším čase fáze pro danou okamžitou hodnotu modulačního signálu nemusí shodovat s fází v předchozím čase, kdežto u fázové modulace je v kterémkoli okamžiku fáze nosné frekvence pevně vázána na okamžitou hodnotu modulačního signálu. Velmi názorně to uvidíme v odstavci o modulaci digitálními signály.



Obrázek 10.3: Fázově modulovaná nosná vlna

## **Modulace digitálními daty**

Modulace digitálními daty řeší dva problémy:

1. Reprezentace binárních dat sérií impulsů o dvou, příp. více, napěťových úrovních
2. Modulace nosné vlny impulsním signálem

### **Reprezentace binárních dat**

Prvý problém spočívá v tom, že data v počítači mají obvykle jednoduchou reprezentaci dvěma hodnotami napěťových úrovní, které se v logických obvodech zpracovávají jako paralelní binární slova o určitém počtu bitů (vstupují do aritmetických a logických operací a jsou zaznamenávána v registrech a v pamětech). Pro přenos mezi systémy, a v poslední době stále častěji i uvnitř systému, musejí být data přenášena jako data sériová, kdy jsou na jednom vodiči data přenášena bit po bitu. Takto také data vstupují do modulátoru, pokud mají být přenesena radiovým nebo optickým spojem.

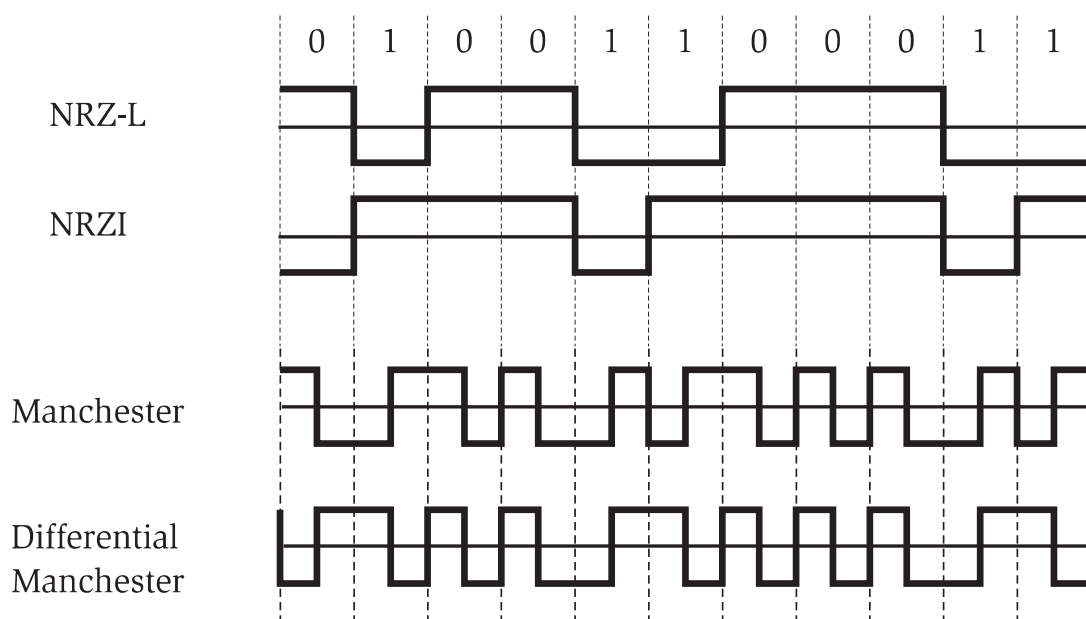
Uvedli jsme, že pro přenos informace modulovanou vlnou je potřeba určité frekvenční pásmo. Bude nás tedy zajímat, jaké frekvenční pásmo budou sériová data pro přenos potřebovat. Budeme hledat takové impulsní průběhy, které při přenosu spotřebují co nejužší pásmo. Zhruba platí, že šíři pásma určuje kmitočet přechodů mezi napěťovými úrovněmi (čím častěji se úroveň mění, tím vyšší kmitočtové pásmo musí být k dispozici, aby se po demodulaci dal signál bezchybně rekonstruovat).

Ve výkladu o posuvných registrech jsme uvedli, že posuvný registr je vhodným elementem pro vytvoření a zachycení sériových dat. Pro posuvný registr však potřebujeme zdroj zapisovacích impulsů. Na straně vysílače není obvykle se zapisovacími impulsy žádný problém, protože se v logických obvodech dá správně načasovat přísun dat a jejich postupné vysílání. Na straně přijímače však může problém nastat, pokud není sig-

nál pro zápis přenášen druhým přenosovým kanálem (resp. po druhém vodiči). Pokud tedy je k dispozici pouze sériová řada impulsů o dvou úrovních, musí být přijímající zařízení schopno zapisovací impulsy samo vytvořit. K tomu potřebuje informaci o kmitočtu zapisovacích impulsů a jejich časovém průběhu (fázi). K identifikaci kmitočtu zápisů poslouží „měření“ vzdálenosti hran v přijímaném signálu. Takové měření bude tím spolehlivější, čím více hran v sériovém signálu bude.

Zřejmě jde o protichůdné požadavky. Na jedné straně šířka pásma a požadavek na nízký kmitočet změn v signálu a na druhé straně požadavek na dostatečný počet přechodů kvůli synchronizaci zápisu sériových dat. Dalším požadavkem bývá, aby se v datovém signálu obě napěťové úrovně střídaly s přibližně shodnou četností.

Užívané způsoby reprezentace binárních dat ukazuje obrázek.



Obrázek 10.4: Binární data a jejich reprezentace

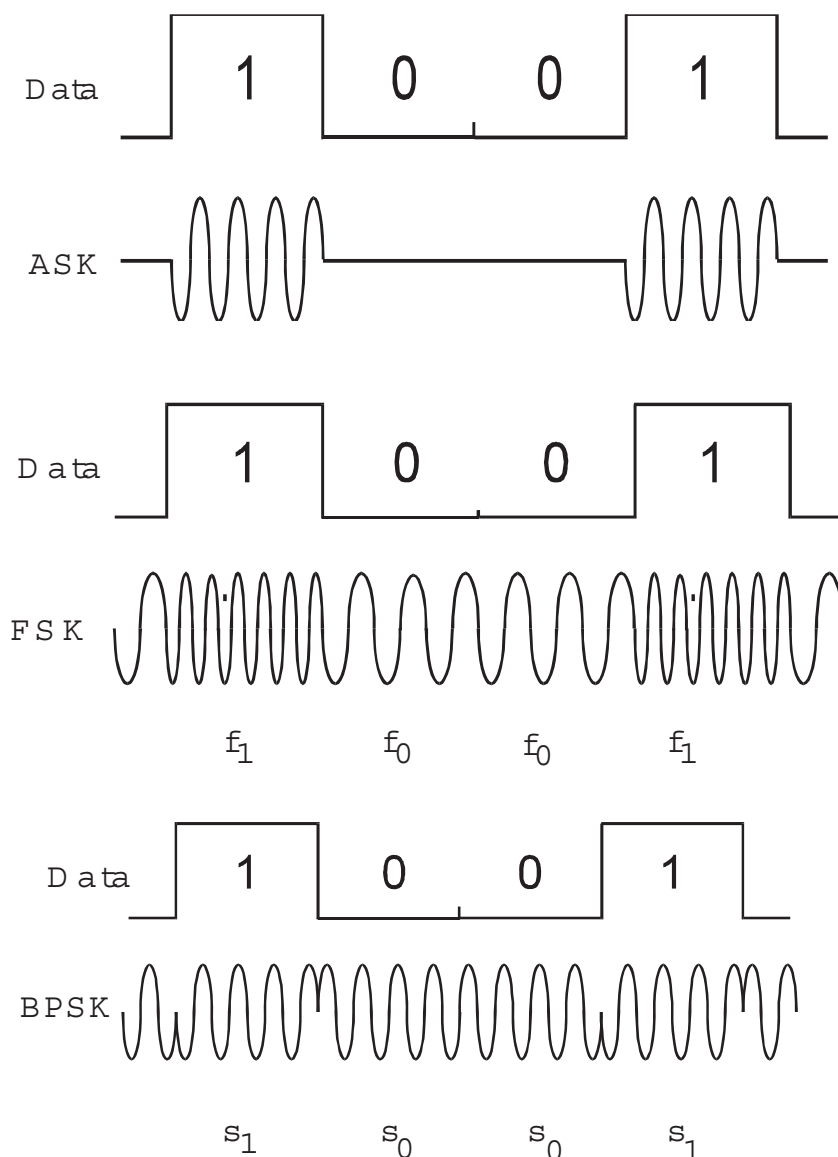
- NRZ-L (Not Return to Zero – Level) je nejjednodušší řešení, kdy je přímo vázána úroveň napětí na logický stav. Informace o synchronizaci se zcela ztratí při přenosu dlouhých sekvencí s trvalou jedničkou nebo trvalou nulou. Problém je

v řadě aplikací řešen na úrovni předzpracování dat (scrambling, stuffing).

- NRZI (Not Return to Zero Inverted) je systém, který snižuje průměrný počet přechodů použitím diferenciálního kódování. Každá logická jednička se kóduje jako přechod (inverze) do opačné polarity, všechny nuly ponechávají stav sériové linky na předchozí úrovni. Problém obou kódů NRZ je v nespolehlivém zajištění dostatečného počtu přechodů mezi stavy pro potřeby synchronizace a nezabezpečují vyrovnanou četnost impulsů obou polarit (nulovou stejnosměrnou složku).
- Manchester je kód, který bezpečně reprodukuje kmitočet taktování dat. To je zajištěno tím, že v každém bitovém intervalu dochází alespoň k jednomu přechodu mezi stavy. Přenášený bit je reprezentován jedním přechodem uprostřed bitového intervalu – logická nula přechodem  $L \rightarrow H$ , logická jednička přechodem  $H \rightarrow L$ . Na začátku intervalu se stav změní tak, aby se příslušná změna mohla uprostřed intervalu uskutečnit. Signál má nulovou stejnosměrnou složku, potřebuje však dvojnásobnou šířku přenosového pásma.
- Differential Manchester se liší tím, že datový bit rozhoduje na začátku intervalu pouze o přechodu (logická nula), či zachování stavu (logická jednička). Uprostřed intervalu je vždy vytvořený stav invertován.

## Modulace nosné vlny

Na obrázku jsou tři základní principy modulace nosné vlny. Vycházejí ze zmíněných tří principů modulace: amplitudové, frekvenční a fázové.



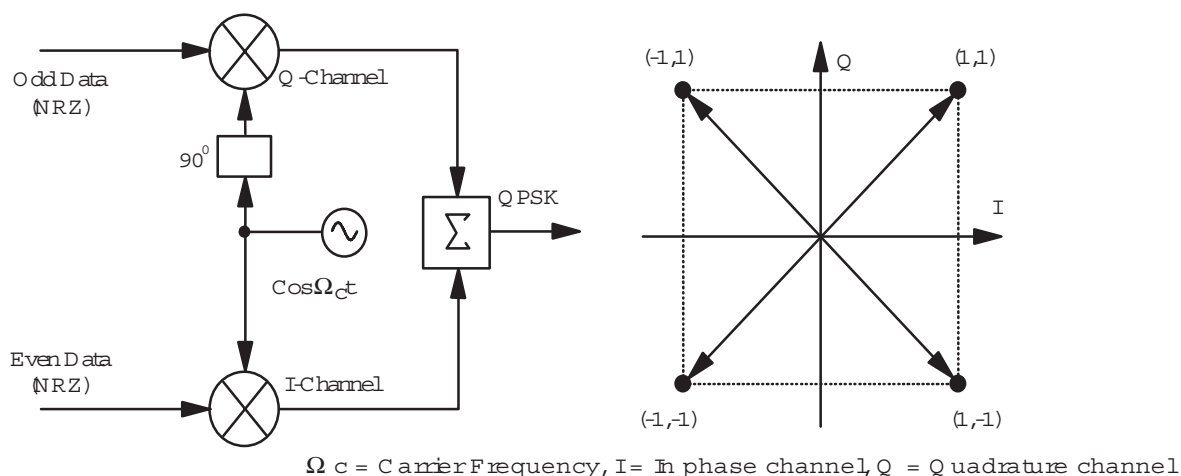
Obrázek 10.5: Modulace dvouhodnotovým signálem

- ASK (Amplitude-Shift Keying, Klíčování nosné) je nejjednodušší způsob modulace nosné vlny. Využívá se v optických spojích, kde modulátor mění intenzitu svitu polovodičového laseru.
- FSK (Frequency-Shift Keying). Modulace je založena na řízení nosného kmitočtu binárním signálem. Střední nosná

frekvence  $\omega_n$  je o malý kmitočtový rozdíl zvýšena pro jeden logický stav ( $\omega_n + \Delta$ ) a pro druhý logický stav snížena ( $\omega_n - \Delta$ ).

- PSK (Phase-Shift Keying) – Modulace fázovým posunem je velmi často používaným způsobem modulace. Binární signál svými logickými stavy zavádí do nosné vlny skokové fázové posuny. Skoky fáze jsou uplatňovány v definovaných okamžicích vázaných na časový průběh nosného signálu. Skok fáze je v případě BPSK (Binary PSK) roven  $180^\circ$ .
- QPSK je kvadrurní fázová modulace, které naznačuje cestu, kterou se rozvíjejí modulační algoritmy. Její princip spočívá v tom, že fáze signálu může být posunuta do čtyř různých hodnot, takže jedním skokem ve fázi je do nosného signálu namodulována dvojice bitů.

#### M o d u l a t i o n - Q P S K



$\Omega_c$  = Carrier Frequency, I = In phase channel, Q = Quadrature channel

Obrázek 10.6: Kvadrurní fázová modulace



## Kapitola 11

### Magnetické materiály a jejich aplikace

Magnetických jevů jsme se dotkli v úvodních kapitolách, když jsme hledali vztahy mezi obvodovými veličinami na svorkách induktoru. Tam jsme definovali magnetický indukční tok  $\Phi$ . Nyní stručně shrneme další poznatky o magnetismu a o vztazích mezi elektrickým proudem, magnetickou indukcí a jevy v magnetickém poli.

S proudem procházejícím vodičem bezprostředně souvisí magnetický indukční tok. Geometrie uspořádání vodičů (cívka, rovný vodič, dvojice vodičů) a prostředí v okolí vodičů určují pro vybrané místo v magnetickém poli hustotu a tvar magnetických siločar – magnetickou indukci  $B$ . Pro magnetickou indukci  $B$  platí vyjádření

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

kde  $S$  je plocha kolmá k siločarám a  $B$  je magnetická indukce v jednotkách tesla [T] ( $1\text{T}=1\text{Wb/m}^2$ ).

Kolik magnetického toku vytvoří elektrický proud je z hlediska obvodových veličin postiženo definicí indukčnosti, ale z hlediska magnetických jevů v okolí vodiče není tento systém vztahů reprezentativní. Pro magnetické účinky proudu je zavedena veličina nezávislá na prostředí – intenzita magnetického pole  $H$ , která má rozměr [A/m]. Tuto intenzitu má magnetické pole uprostřed kruhového závitu o poloměru 1 m, pokud závitem protéká proud 1 A. Pro magnetickou indukci, kterou pole  $H$  vytvoří, platí

$$B = \mu H,$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí.

Vidíme, že při daném proudu vodičem jsou, jak magnetický tok, tak magnetická indukce, závislé na prostředí, ve kterém je elektrický vodič s daným proudem umístěn. Bude na něm tedy závislá indukčnost cívky i přímého vodiče.

Ve vzduchu je magnetická indukce určena konstantou

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

Každý materiál v magnetickém poli vykazuje určitou permeabilitu obecně označovanou  $\mu$  (s tímtež rozměrem [H/m]). Je rovněž zaveden pojem relativní permeabilita  $\mu_r = \mu/\mu_0$ , bezrozměrná veličina určující poměr mezi permeabilitou daného materiálu a permeabilitou vzduchu.

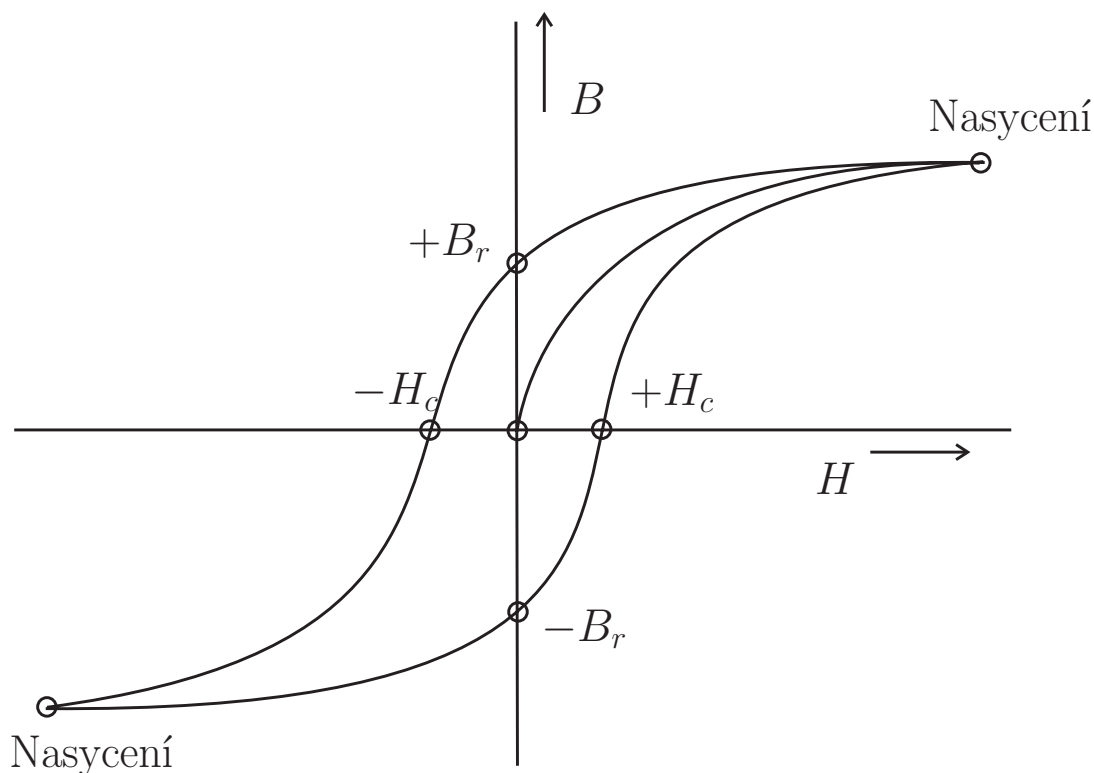
Materiály, s kterými se setkáváme v elektrotechnice, můžeme rozdělit takto:

- diamagnetické látky – relativní permeabilita  $\mu_r < 1$ , např. měď, křemík, zlato, zinek, mosaz, grafit, ...
- paramagnetické látky – relativní permeabilita  $\mu_r > 1$ , např. platina, alkalické kovy, feromagnetika nad Curieovým bodem, ...
- feromagnetické látky – relativní permeabilita  $\mu_r \gg 1$ , např. železo, nikl, kobalt, ...
- ferimagnetické látky chovají se jako feromagnetika, jedná se o všechny druhy feritů.

Feromagnetické látky vykazují pokles relativní permeability s teplotou a nad Curieovou teplotou  $T_C$  přechází feromagnetikum do paramagnetického stavu. Pro železo je  $T_C = 768^\circ \text{C}$ , pro nikl je  $T_C = 360^\circ \text{C}$ .

Feromagnetické materiály jsou takové materiály, které mohou být zmagnetizovány působením vnějšího magnetického pole. Toto pole může být vytvořené permanentním magnetem

nebo elektromagnetem. Feromagnetické látky jsou charakterizovány magnetizační křivkou. Typická křivka magnetizace je na obrázku.

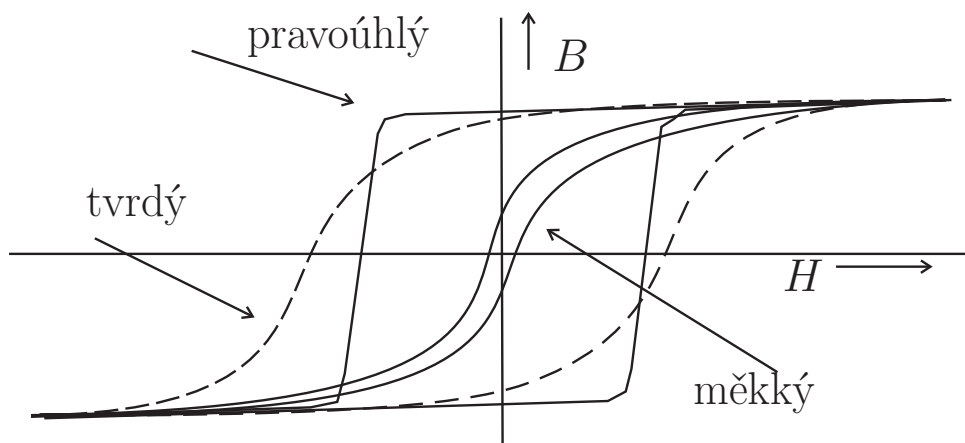


Obrázek 11.1: Hysterzní křivka

Uvažme nejprve materiál, který není zmagnetizován. Při zvyšování vnějšího magnetického pole  $H$  se zvyšuje také indukce  $B$ . Křivka vychází z počátku a dospěje k nasycení. Při snižování vnějšího pole se snižuje také indukce, ale závislost nesleduje původní křivku. Klesne-li vnější pole na nulu, zůstane v materiálu určitá magnetická indukce, která se nazývá remanentní magnetická indukce, remanence  $B_r$ . Materiál je zmagnetován. Pokud se vnější pole dále snižuje klesá i indukce. Intenzita pole, pro kterou je magnetická indukce nulová, se nazývá koercitivní intenzita, neboli koercitivita  $H_c$ . Součin těchto dvou hodnot se někdy nazývá síla magnetu. Další pokles pole vyvolá vznik magnetizace ve směru opačném k původní

magnetizaci. Křivka postupuje velmi podobně k nasycení, remanentní magnetizaci a koercitivitě.

Podle tvaru hysterezní křivky se rozdělují magnetické materiály na magneticky měkké a magneticky tvrdé. Tvrdost je chápána jako „tvrdá obrana“ materiálu před přemagnetováním. Tedy magneticky tvrdé materiály mají hysterezní křivku širokou, s velkou remanencí a koercitivitou. Lze ukázat, že k jejich přemagnetování v poli elektrického vodiče (v cívce) je potřeba velký elektrický výkon. Naproti tomu jsou materiály magneticky měkké, které se přemagnetovávají snadno. Křivku měkkého a tvrdého materiálu ukazuje obrázek.



Obrázek 11.2: Hysterezní křivka tvrdého a měkkého feromagnetika

Na obrázku je uveden ještě jeden typ charakteristiky magnetického materiálu. Vhodným technologickým postupem lze materiál zpracovat tak, že jeho hysterezní křivka má velmi „hranatý“ tvar – pravoúhlou hysterezní charakteristiku. Takové materiály umožňují využití magnetické remanence k uchování binárních informací. Historicky nejstarší využití představuje konstrukce feritové paměti.

Ukažme některé oblasti, ve kterých se využívají magnetické materiály.

**Materiály magneticky měkké** jsou nejčastěji používány v transformátorech a elektrických motorech. Transfor-

---

mátor je vyroben tak, že elektrický proud vytváří v navinuté cívce (primární) magnetický tok, který, prochází-li jinou cívkou (sekundární), indukuje na jejích svorkách elektrické napětí. Již víme, že magnetický tok musí být časově proměnný, má-li v sekundární cívce napětí vyvolat. Proto i primární proud musí být proměnný, a jen jeho změny mohou vyvolávat potřebné změny indukčního toku. Transformátor tedy může transformovat z primární do sekundární cívky jen střídavé napětí, případně impulsní napětí s dostatečně vysokou rychlostí změn napěťových úrovní. Vlastnosti transformátoru lze v tomto ohledu přirovnat k vlastnostem derivačního obvodu, který rovněž nepřenáší stejnosměrné napětí ani proud. Transformátor tedy bude v konkrétním zapojení obvodu možno popsat dolním mezním kmitočtem. Každý transformátor bude nepochybně vykazovat i omezenou šířku pásma v oblasti vysokých kmitočtů.

Základní vztah, který popisuje vlastnosti transformátoru, vychází ze vztahu mezi indukčním tokem a indukovaným napětím  $\rightarrow u = d\Phi/dt$ . Je-li transformátor uspořádán tak, že oběma cívkami prochází společný magnetický tok, můžeme předpokládat, že každý závit primární cívky vytvoří svůj příspěvek k celkovému toku. Celkový tok tak bude  $N_1$ -násobkem toku vytvořeného jedním závitem primární cívky. Tentýž tok bude indukovat v sekundární cívce o  $N_2$  závitů  $N_2$ -násobek napětí, které připadlo na jeden závit cívky primární. Takže platí

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \Rightarrow \quad u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1}$$

Poznamenejme, že transformátor nelze vyrobit tak, aby naprosto všechnen tok primární cívky procházel sekundární cívkou. Rovnice tedy nebude platit přesně a pro popis reálných transformátorů se zavádějí různé koeficienty charakterizující

dokonalost (stupeň) vazby mezi vinutími. Všechny konstrukce transformátorů se ideální vazbě mezi vinutími snaží přiblížit. Příkladem dobře fungujícího uspořádání může být transformátor na toroidním jádře.

Každá praktická aplikace transformátoru vyžaduje nejen zajištění transformačního poměru  $N_2/N_1$ . V obvodu vždy hraje velmi významnou roli i indukčnost primáru a sekundáru a energetické ztráty dané ohmickým odporem vinutí obou cívek a ztrátami, které přináší potřeba přemagnetovávat magnetické jádro, na kterém jsou cívky navinuty. Může pak být užitečné (např. v simulačním programu) zadávat transformační poměr údajem o indukčnosti  $L_1$  primární a indukčnosti  $L_2$  sekundární cívky a činitelem vazby  $K$ . Ten si můžeme představit jako zlomek z indukčního toku vytvořeného primárem, který projde všemi závity sekundáru.

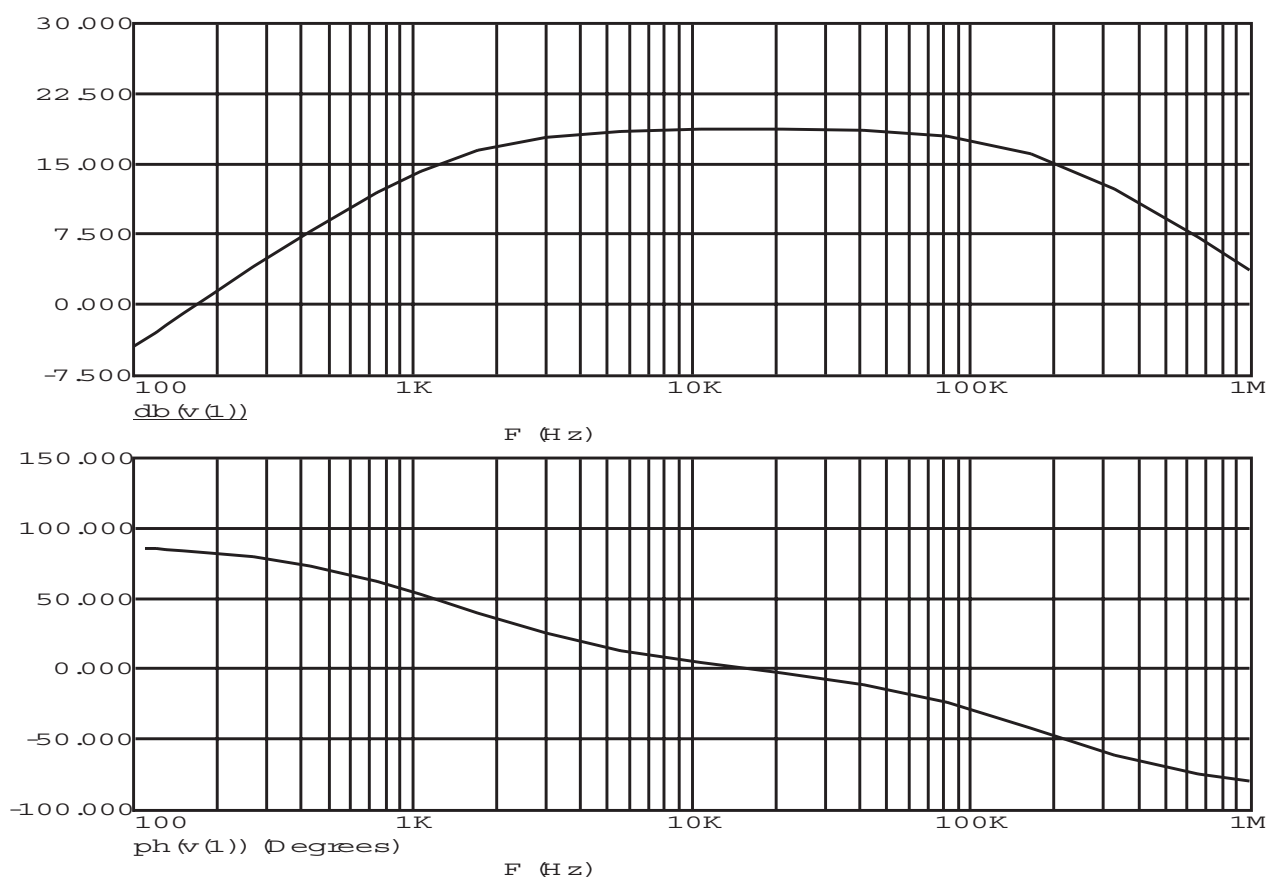
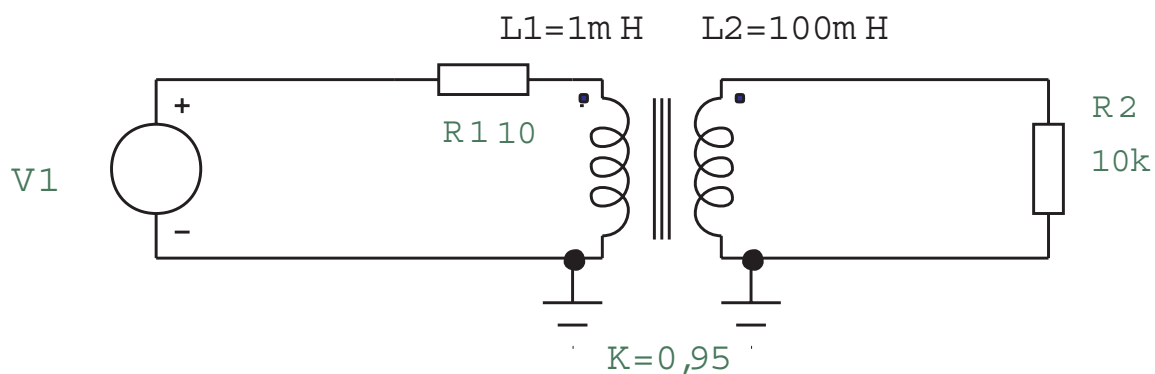
Pro indukčnost cívky o  $N$  závitech, která má plochu závitu  $S$  a délku vedle sebe nakladených závitů  $l$  platí přibližný vztah

$$L \approx \mu \frac{N^2 S}{l}.$$

Jen výjimečně bude mít transformátor takové provedení. Ze vztahu však vytěžíme informaci, že indukčnost cívky je úměrná kvadrátu počtu závitů, takže lze z měření na transformátoru usoudit na jeho přenos s využitím vztahu

$$u_2 \approx K u_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

Následující obrázek ukazuje simulaci jednoduchého obvodu s transformátorem.



Obrázek 11.3: Obvod s transformátorem



**Materiály magneticky tvrdé** jsou charakteristické tím, že vykazují využitelnou magnetickou remanenci. Nejvýznamnější využití magneticky tvrdých materiálů je v oblasti výroby permanentních magnetů, které používáme na magnetických tabulích, ve spínačích s jazýčkovými kontakty, v bezkolektorových motorech, atd.

Feritové magnety jsou nejlevnější běžné permanentní magnety a jsou typickým představitelem feromagnetických materiálů. Základ feritu tvoří ve většině případů směs oxidů železa s uhličitanem barnatým nebo strontnatým, s použitím výrobní technologie práškové metalurgie. Remanence může být  $B_r = 0,2 \div 0,5 \text{ T}$ . Koercitivita  $H_c = 0,1 \div 0,7 \text{ A/m}$ .

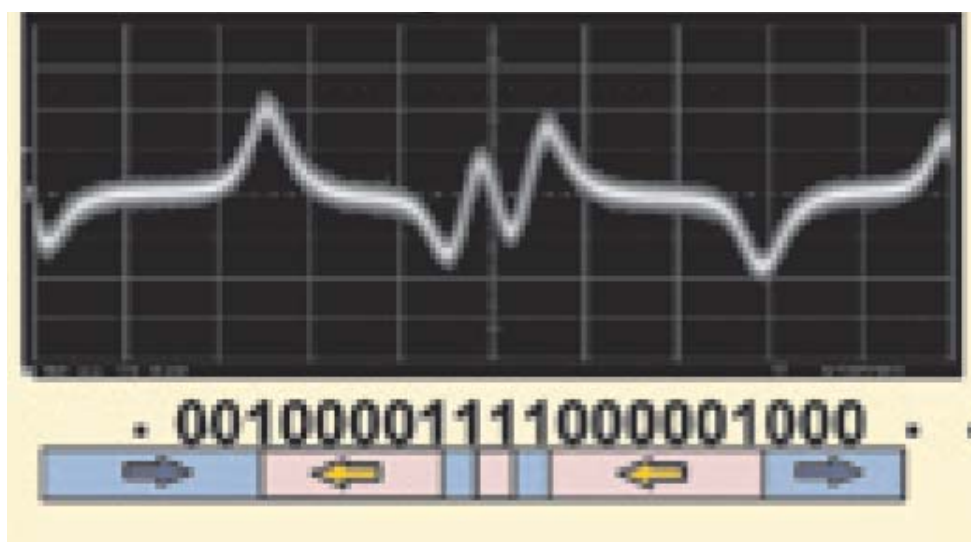
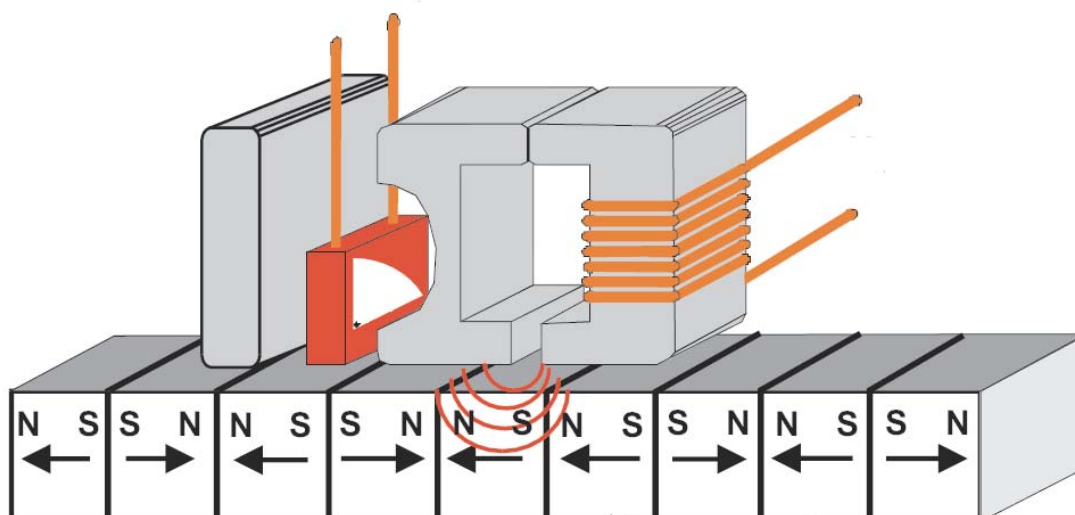
Magneticky tvrdé vrstvy nanesené na různé pohyblivé nosiče slouží k záznamu analogových signálů i digitálních dat.

V analogové technice jsou používány magnetofonové pásy pro záznam akustických i obrazových signálů. Magnetické médium musí umožnit reprezentovat spojitě se měnící okamžitou hodnotu zaznamenávaného signálu. Záznam je založen na schopnosti uchovat, v různých místech magneticky tvrdé vrstvy na povrchu pásy, různou úroveň magnetické remanence. Zmagnetování na potřebnou úroveň remanence zabezpečí záznamová hlava. Ta je zkonstruována tak, že magnetický obvod z magneticky měkkého materiálu tvoří ve vzduchové mezeře magnetický tok schopný zmagnetovat magneticky tvrdý materiál na povrchu pohybujícího se záznamového média. Při čtení zaznamenané informace podobná (čtecí) hlava ve vzduchové mezeře svého magnetického obvodu zachycuje okamžité změny magnetického toku na povrchu nosiče a magnetickou indukci vytváří v navinuté cívce spojitě napětí.

Pro záznam binárních dat je možno použít pro povrch média materiál, u kterého se nevyžaduje spojitá reprezentace úrovně

zaznamenávaného signálu. Naproti tomu se vyžaduje schopnost materiálu na malých vzdálenostech zaznamenat co nejvíce změn v orientaci remanentní indukce. Princip záznamu ukazuje následující obrázek.

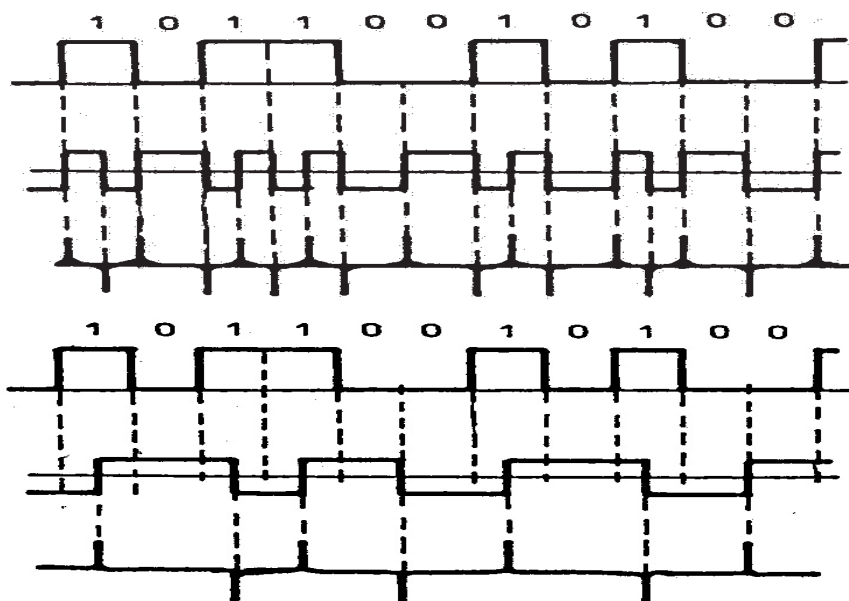
[http://www.bellmicro.com/partners/linecard/suppliers/hitachi-global/PMR\\_white\\_paper\\_final.pdf](http://www.bellmicro.com/partners/linecard/suppliers/hitachi-global/PMR_white_paper_final.pdf)



Obrázek 11.4: Princip magnetického záznamu dat

Obrázek ukazuje příklad záznamu průběhu dat, který jsme poznali i v předchozím výkladu. Problém, kterého jsme se dotkli při výkladu o sériovém přenosu dat, je zde rovněž velmi

aktuální. Je zřejmé, že rychlost pohybu nosiče zaznamenaných dat bude určovat rychlost vybavování jednotlivých impulsů, které vytvářejí přechody mezi dvěma orientacemi remanence. Dlouhé sekvence dat reprezentovaných jednou orientací remanence nelze vůbec připustit. Signál z čtecí hlavy produkuje jen impulsy indikující přechod mezi oběma směry magnetizace. Protože rychlost pohybu nosiče nelze zaručit, musejí zaznamenaná data obsahovat tolik definovaných přechodů mezi stavy, aby bylo možno pružně reagovat na změny v rychlosti vybavování jednotlivých bitů. Pro záznam dat na magnetická média existuje propracovaný systém způsobů kódování dat, který zohledňuje potřebu spolehlivé identifikace okamžité bitové rychlosti.



Obrázek 11.5: Princip magnetického záznamu dat

Prvý princip se označuje jako systém FM (frekvenční modulace) a spočívá v reprezentaci nuly půlperiodou obdélníkového signálu o zvoleném kmitočtu a reprezentaci logické jedničky celou periodou dvojnásobného kmitočtu. Druhý princip se označuje jako MFM (modifikovaná frekvenční modulace) a vykazuje menší počet přechodů na jeden bit i při zachová-

ní bezpečného počtu přechodů pro identifikaci synchronizace. Následující tabulky popisují systém FM, MFM a RLL. Systém kódování RLL se vyznačuje ještě nižší frekvencí přechodů na jeden bit než má kódování MFM. Kódování MFM se používá u pružných disků. Kódování RLL u harddisků.

B it	Zakódování
0	PN
1	PP

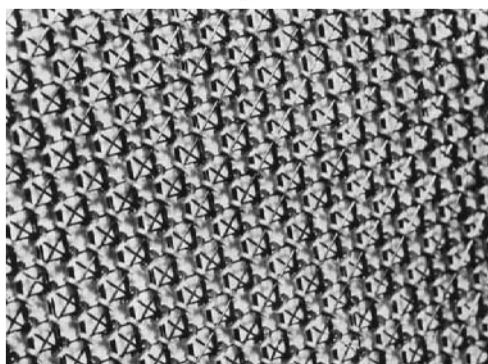
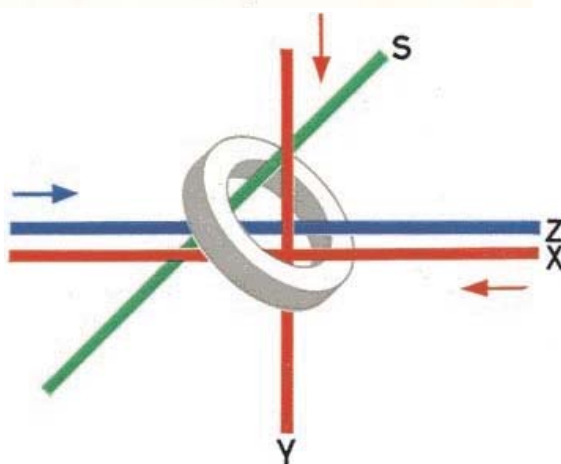
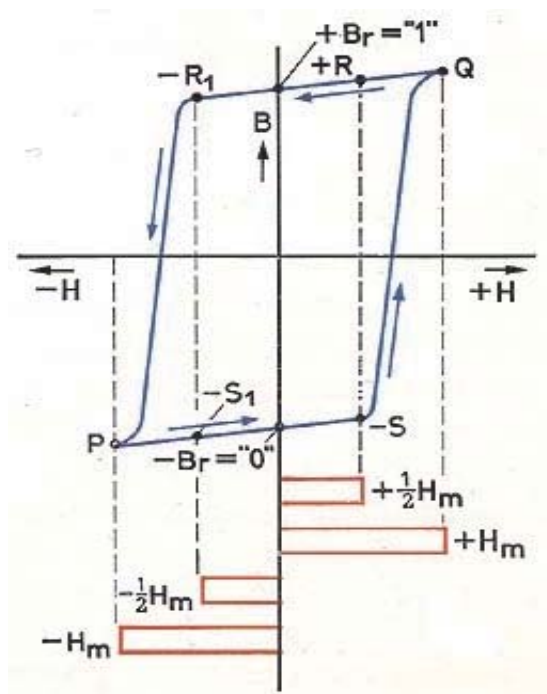
B it	Zakódování
0	PN jestli je v datech 00 NN jestli je v datech 10
1	NP

V zorek	Zakódování v M FM	Pocet im pulsů	Zakódování v FM	Pocet im pulsů
101100	N P N N N P N P N N P N	4	P P P N P P P P N P N	9

V zorek	Zakódování v R L L	Pocet im pulsů	Zakódování v M FM	Pocet im pulsů
00	P N N N	1	P N P N	2
01	N P N N	1	P N N P	2
100	N N P N N N	1	N P N N P N	2
101	P N N P N N	2	N P N N N P	2
1100	N N N N P N N N	1	N P N P N N P N	3
1101	N N P N N P N N	2	N P N P N N N P	3
111	N N N P N N	1	N P N P N P	3

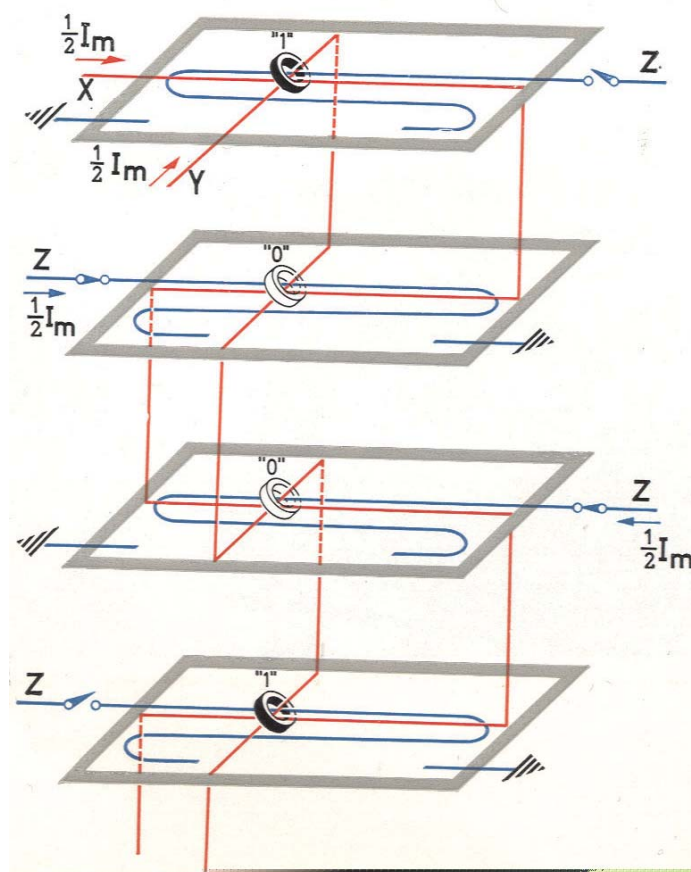
Obrázek 11.6: Princip magnetického záznamu dat

Na této stránce je bez komentáře vyobrazen princip historické paměti z feritových jader s pravoúhlou hysterzní křivkou. Viz <http://ppewww.physics.gla.ac.uk/~doherty/CoreMemIndex.html>

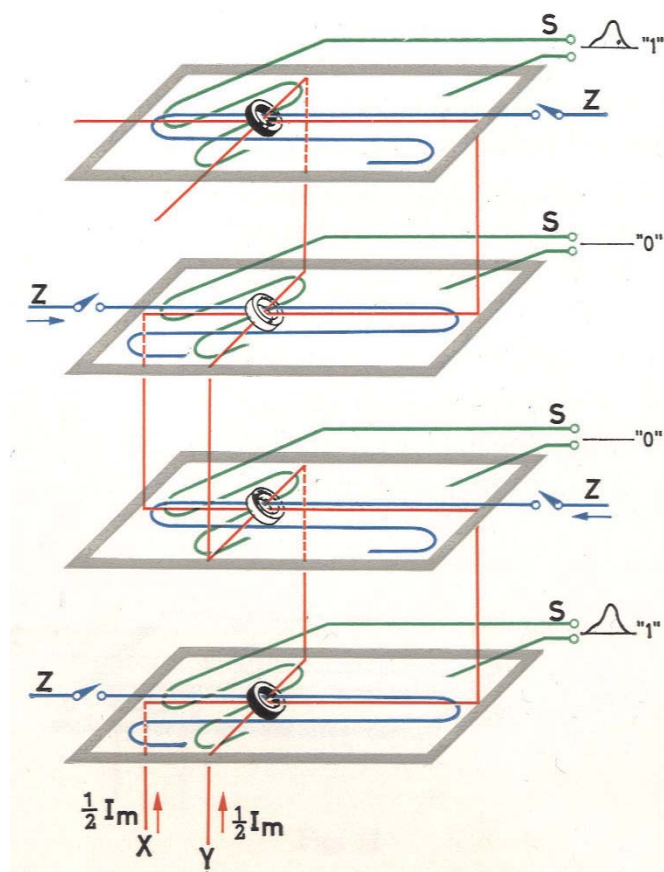


Obrázek 11.7: Princip feritové paměti

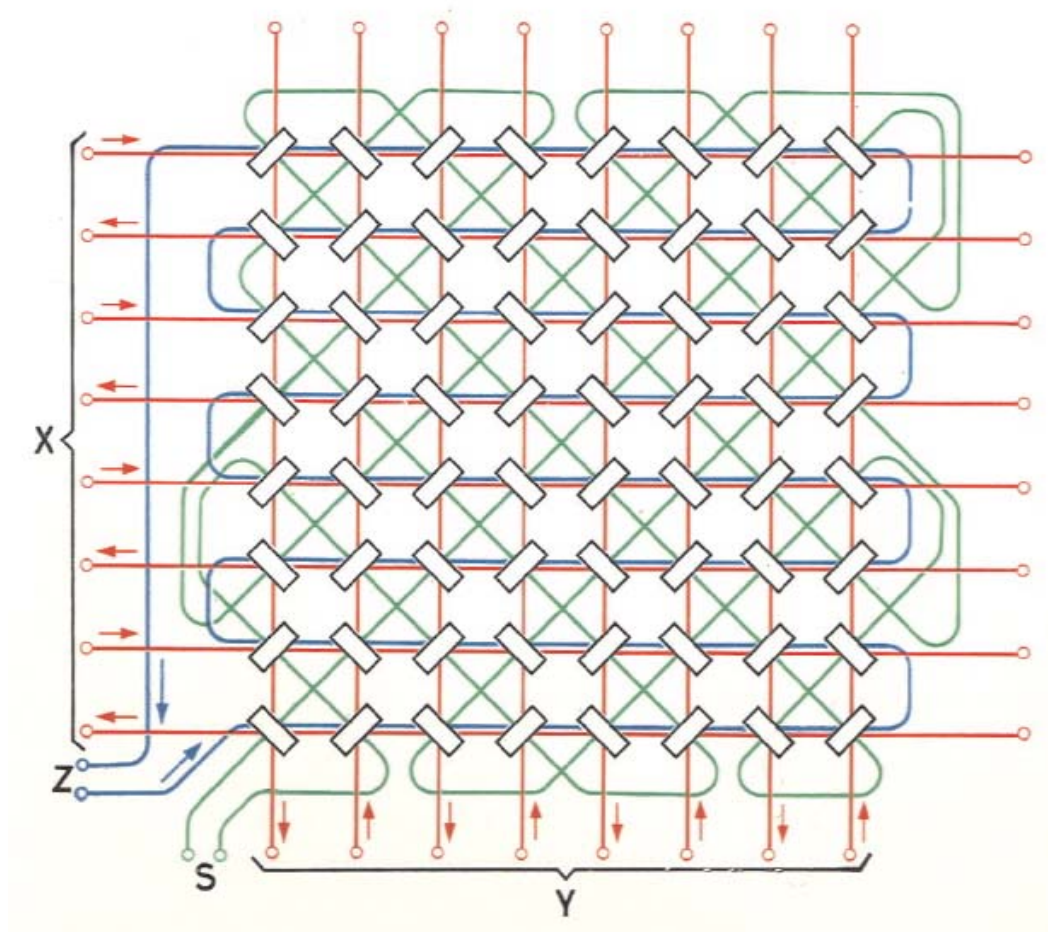
WRITE



READ







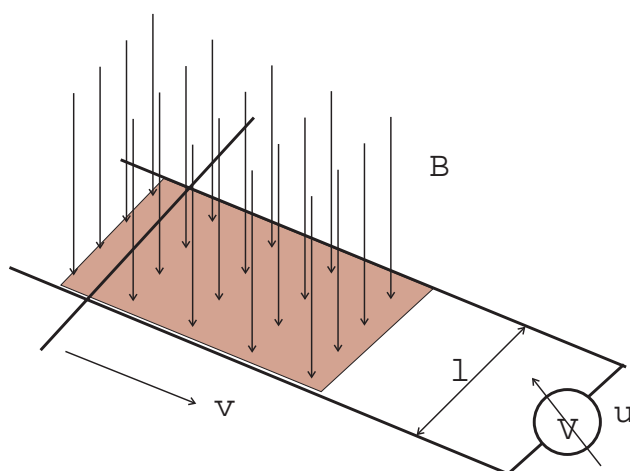
Obrázek 11.9: Princip feritové paměti



## Kapitola 1

### Pohybové mechanizmy

Nejprve popíšeme dva fyzikální pokusy. Prvý ukazuje, jak lze využít mechanického pohybu k vytvoření napětí a proudu ve vodiči umístěném v magnetickém poli. Princip experimentu je na obrázku.



Obrázek 1.1: Princip vzniku napětí na pohybujícím se vodiči

Pohybuje-li se vodič naznačeným směrem rychlostí  $v$  [m/s] po „kolejnicích“ vzájemně vzdálených  $l$  metrů, umístěných v kolmo působícím magnetickém poli o indukci  $B$  [T], dochází k zmenšování magnetického toku na ploše takto vytvořeného elektrického obvodu. Vytváří se proměnný magnetický indukční tok. Proměnný tok v obvodu indukuje napětí. K tomu lze odvodit matematický vztah.

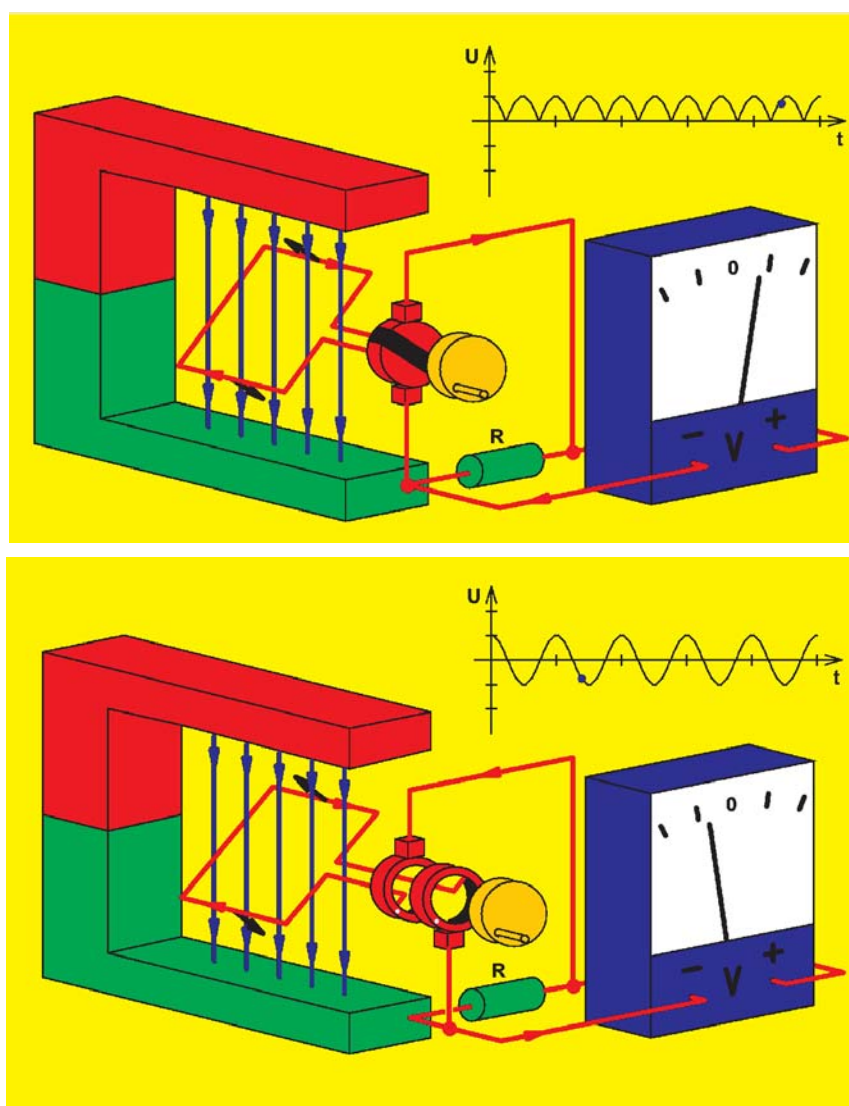
$$u = B \cdot l \cdot v,$$

Vztah ukazuje, že indukované napětí je přímo úměrné rychlosti pohybu, velikosti indukce i délce vodiče.

Uvedený princip je využit ve všech zdrojích elektrické energie vyráběné z energie pohybové. Všechny veličiny ze vzorce

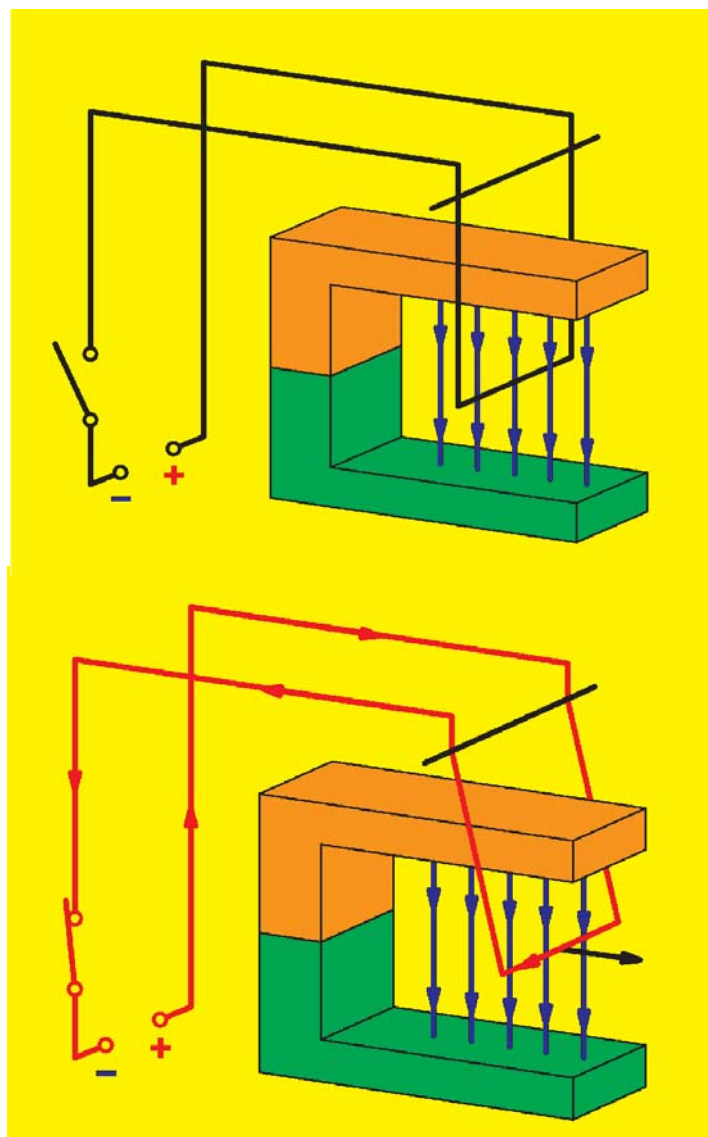
lze využít pro splnění požadavků na takový zdroj. Délka vodiče obepínajícího magnetický tok může být zvětšena použitím velkého počtu závitů na cívce umístěné v magnetickém poli. To může být vytvořeno nejen permanentním magnetem, ale i využitím vyráběného proudu v elektromagnetu. Rychlost pohybu bude dána mechanickou konstrukcí generátoru.

Na dalším obrázku je schématicky naznačen generátor stejnosměrného (pulsujícího) napětí a generátor střídavého napětí (alternátor), které k vytvoření proměnného toku využívají rotace závitů (závitů) v magnetickém poli magnetu.



Obrázek 1.2: Dynamo a alternátor

Druhý pokus ukazuje, jak působí magnetické pole na vodič, kterým protéká proud. Z obrázku je patrné, že protékající proud vyvolá sílu, která vodič visící jako kyvadlo vychýlí. Síla, pokud proud protéká, působí trvale.



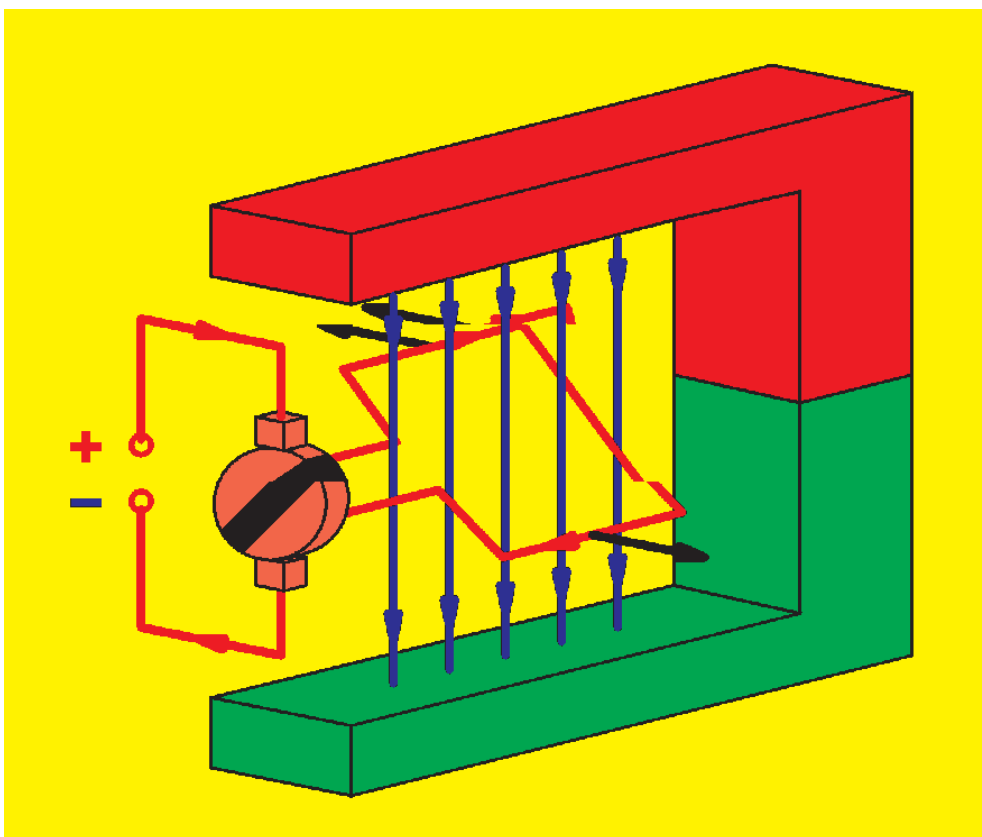
Obrázek 1.3: Síla vytvořená proudem vychyluje visící vodič

Pro sílu platí

$$F = B \cdot I \cdot l,$$

kde  $B$  je magnetická indukce [T],  $I$  je proud [A],  $l$  je délka vodiče kolmo umístěného v homogenním magnetickém poli [m] a  $F$  je síla, která působí na vodič [N].

V magnetickém poli lze umístit závit upevněný na ose (podobně, jako u generátoru proudu). Kolektor na společné ose musí přepínat ve vhodných okamžicích směr proudu tak, aby na vodič působila síla stále ve směru otáčení závitu. Takové uspořádání je na obrázku.

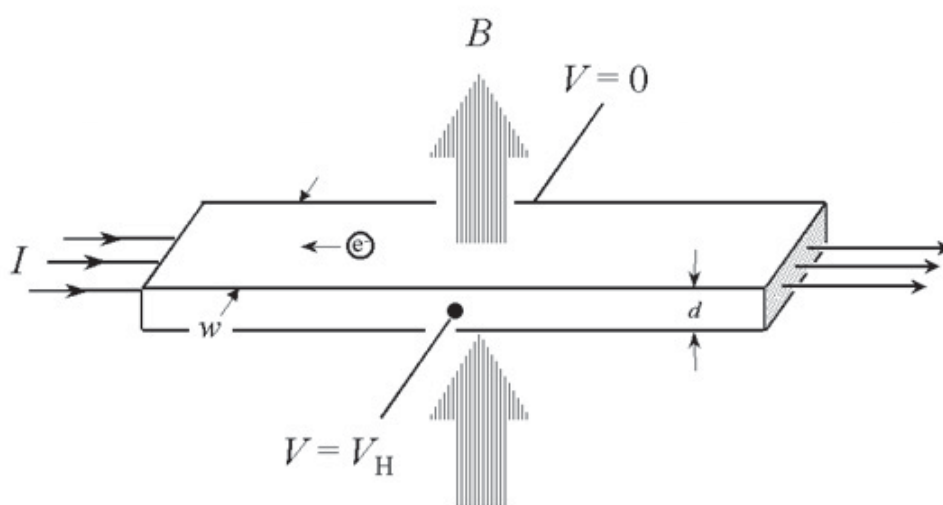


Obrázek 1.4: Princip komutátorového motoru

Síly působící na vodič v magnetickém poli vznikají tím, že magnetické pole působí na pohybující se elementární náboje, v kovovém vodiči na elektrony, které vedou proud.

V televizních obrazovkách vychyluje magnetické pole svazek elektronů. V obrazovce je vakuum, které dovoluje ze žhavé katody uvolnit do prostoru elektrony, které jsou elektrostatickým polem nasměrovány a urychlovány směrem ke stínítku. Správný směr jim určuje magnetické pole, které na ně působí silou podobnou té, která vychýlila visící vodič na předchozím obrázku.

Jiný příklad vychylování proudu vedeného nosiči náboje (děrami a elektrony) představuje element, který využívá tzv. Hallova jevu. Na obrázku je schematicky naznačena struktura, na které je možno Hallův jev pozorovat.



Obrázek 1.5: Hallův jev

Jde o destičku ve tvaru plochého kváдру z polovodivého materiálu, kterou ve vodorovném směru z jedné strany na protější stranu protéká proud. Na kolmo položených (bočních) stěnách jsou elektrody, mezi nimiž není, pokud je destička mimo magnetické pole, patrné elektrické napětí, protože homogenním materiálem protéká proud, aniž by na podélné straně vodiče vznikalo napětí. Bude-li však kolmo k destičce (kolmo ke směru proudu) působit magnetické pole, budou pohybující se nosiče náboje vychylovány ze svých drah a na bocích kváдру bude možno pozorovat tzv. Hallovo napětí, jehož velikost bude tím větší čím větší bude magnetická indukce působící na polovodič. Uvedený princip je využit ve velkém množství praktic-

---

kých aplikací, kde se nejčastěji hovoří o použití tzv. Hallových sond. Jsou např. vyráběna tlačítka, která svým hmatníkem posouvají permanentní magnet do blízkosti Hallovy sondy jejíž výstupní napětí ovládá elektronický spínač. Hallovy sondy se používají v měřicí technice k měření magnetické indukce a ve speciální konstrukci s feromagnetickým jádrem také k měření stejnosměrného i střídavého proudu. Hallovy sondy v různých konstrukcích slouží jako indikátory polohy, kde lze pohyblivé díly jednoduše vybavit feritovými magnety a jimi na sondy působit.

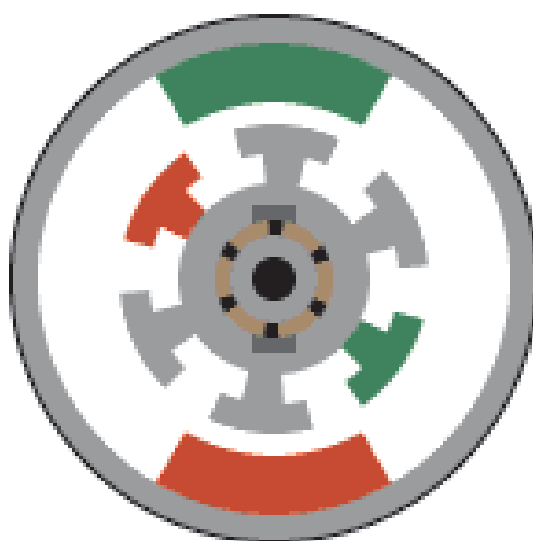
Nyní věnujeme pozornost motorům. Princip kolektorového motoru jsme popsali. Praktické provedení jistě nebude založeno na jediném rotujícím závitu. Závit, kterým protéká proud si lze také představit jako elektromagnet, který leží kolmo k rovině závitu. Konec takového magnetu je pak přitahován k pólu vně umístěného magnetu. Rotace je tedy zajištěna přitažlivými silami dvou magnetů. Pro otáčivou cívku je tedy vhodné, aby měla feromagnetické jádro.

Mezi hlavní části motoru počítáme:

- Část, ve které se budí magnetický tok, tj. kostra s magnety zvanými též póly. Hlavní póly jsou zakončeny pólovými nástavci. Tato část se nazývá stator.
- Část, ve které procházející proud vytváří sílu vyvolávající pohyb, se nazývá rotor nebo kotva.
- Část, ve které se přepíná polarita proudu kotvou se nazývá komutátor. Na komutátor dosedají kartáče pro přívod proudu.
- Ostatní části: štíty, ložiska, ventilátor, držáky kartáčů apod.

Konstrukce stenosměrných motorů se neliší od konstrukce dynam. Každé dynamo může pracovat jako motor a každý motor jako dynamo.

Stator kolektorového motoru může být vybaven buď permanentním magnetem, nebo více magnety, pokud je motor více-pólový, nebo elektromagnety, do kterých je zaveden proud z téhož zdroje jako do rotoru. Statorové elektromagnety mohou být buzeny buď v sérii s rotorem, nebo paralelně s ním. Údaj o tom, jakého zapojení je použito, je důležitou informací, protože způsob zapojení významně ovlivňuje dynamické vlastnosti stroje – otáčky, krouticí moment. Schematické uspořádání motoru ukazuje následující obrázek.

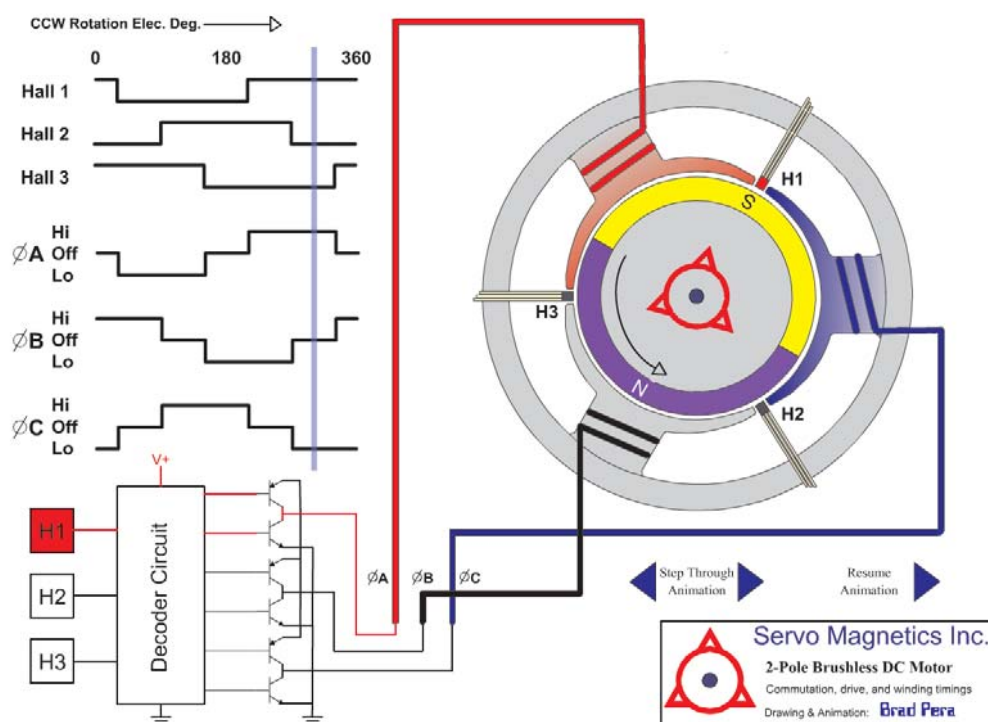


Obrázek 1.6: Kolektorový motor

Kolektorové motory s permanentními magnety ve statoru mohou být provozovány jen na stejnosměrný proud. Naproti tomu kolektorové motory s elektromagnety ve statoru mohou pracovat i na střídavý proud, protože se magnetické toky vytvářené proudem mění podle polaritý jak ve statoru, tak v kotvě a potřebné síly jsou stále stejné. Změna směru otáčení u stejnosměrného motoru je možná změnou polaritý napětí na kolektoru, u střídavého motoru s buzenými statorovými cívkami je třeba zaměnit přívody ke kolektoru, při daném zapojení konců statorového vinutí, nebo naopak, zaměnit přívody ke statoru a zachovat připojení kolektoru.



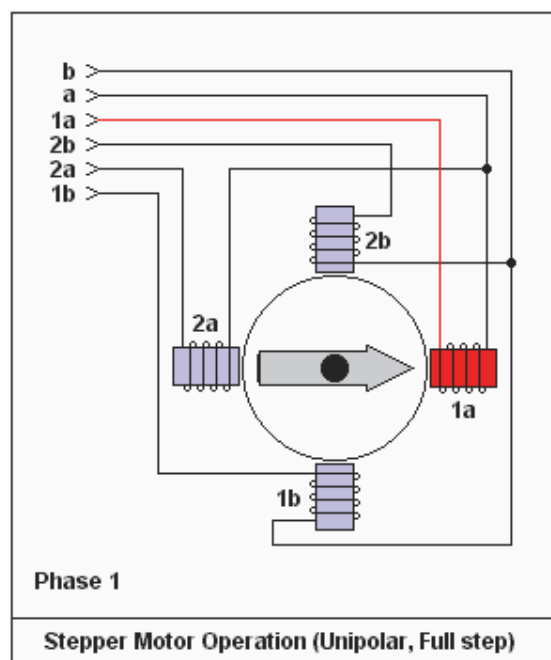
Kolektor všech kolektorových motorů je zdrojem rušení, kartáče se opotřebovávají a kolektor obrušuje. Výrobně je stroj poměrně náročný. Proto se v současné době stále více prosazují **stroje bezkolektorové** (brushless motors).



Obrázek 1.7: Princip bezkolektorového motoru

Bez kolektorový motor je vybaven permanentním magnetem v kotvě. Stator se skládá z pólů, které jsou svými vinutími buzeny jako elektromagnety. Každý pól je buzen proudem s jiným časovým průběhem tak, že se póly rotorového magnetu stále přitahují k některému pólovému nastavci. Časový průběh buzení pólů statoru musí být generován s ohledem na okamžitou polohu rotoru, aby si pólové nastavce rotor stále „podávaly“. Informaci o poloze rotoru, dodává řídicímu obvodu Hallova sonda. Vidíme, že mechanicky velmi nenáročný motor musí být vybaven elektronickými senzory a řídicí elektronikou se spínači proudu do statoru. Jistě jde o výhodné řešení, ve kterém se kromě ložisek nic neopotřebovává, nic nejiskří ani nehlučí.

**Krokové motory** jsou určeny pro aplikace, kde je třeba přesně určovat nejen otáčky, ale i okamžitou polohu hřídele. Princip ukazuje následující obrázek.



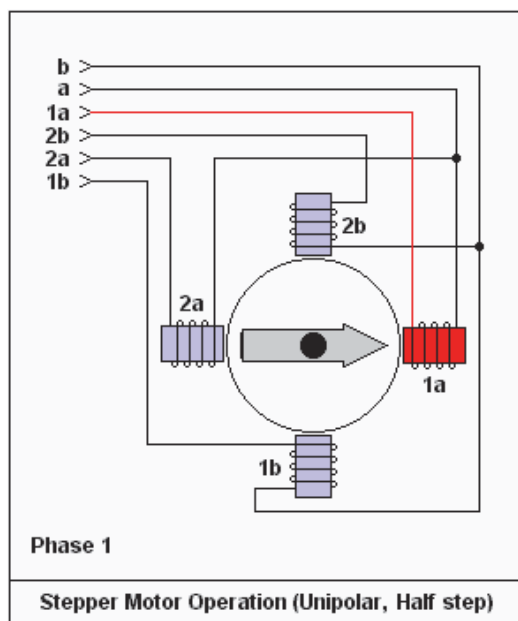
Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	1	0	0	0
6	0	1	0	0
7	0	0	1	0
8	0	0	0	1

Clockwise Rotation  
↓

Obrázek 1.8: Krokový motor

Z tabulky pod obrázkem je patrné, jak lze binárním signálem dosáhnout rotace kotvy. Uvedený typ konstrukce a řízení charakterizuje údaj „unipolární“ – jeden magnet v kotvě a „full-step“ – kroky jsou od jednoho pólového nastavce k následujícímu o celou vzdálenost mezi nimi.

Na dalším obrázku je krokový motor, který má pochopitelné označení „unipolar“, „half-step“. Stal se jím jen tím, že je změněn způsob spínání proudu do statoru.



Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	1	0	0	0
10	1	1	0	0
11	0	1	0	0
12	0	1	1	0
13	0	0	1	0
14	0	0	1	1
15	0	0	0	1
16	1	0	0	1

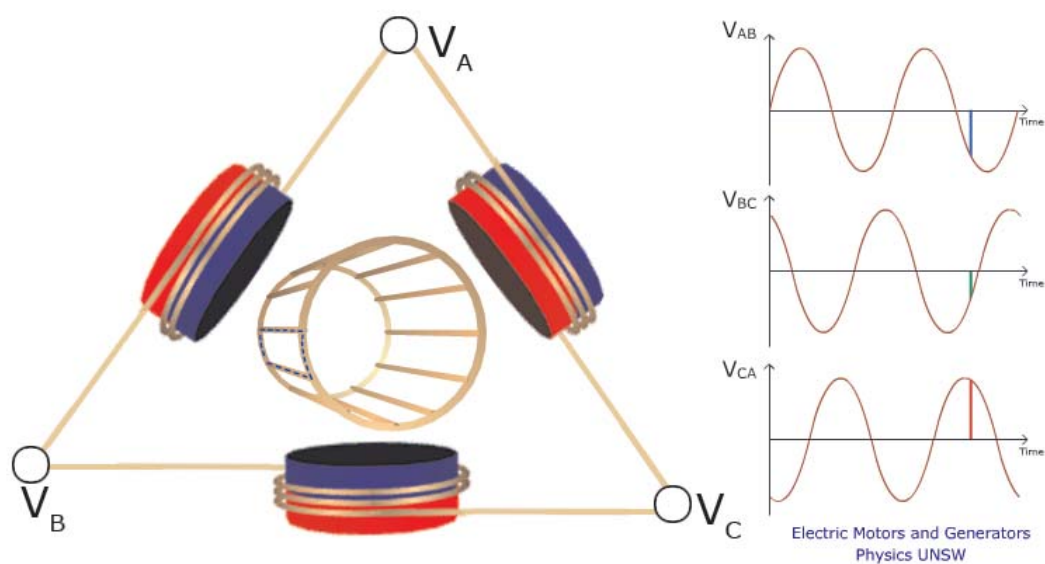
Obrázek 1.9: Krokový motor

Z tabulky plyne, že do každé následující polohy bude hřídel pootočena o  $45^\circ$ .

**Indukční motory** jsou zkonstruovány jen pro buzení střídavým proudem. Se současnými možnostmi spínací polovodičové techniky není velký problém „vyrobit“ pro ně potřebná napětí z libovolného zdroje. Velmi zjednodušeně lze říci, že magnetické pole statoru indukuje v rotoru takové proudy, že zmagnetují stator tak, že se za polem statoru stále otáčí. Vyžaduje to ve statoru tzv. točivé magnetické pole, které může vytvořit třífázový systém napětí tak, jak je rozváděn v elektrovodné síti, ale může být použit i analogický systém napětí vytvořený elektronickými obvody s požadovaným kmitočtem.

Třífázové asynchronní motory mají trojfázové statorové vinutí rozložené rovnoměrně po obvodu statoru. Rotor má „vinutí“, které může být vytvořeno klecí – tzv. kotvou nakrátko, nebo vinutím s vývody na kroužcích (kroužková kotva).

Princip činnosti je založen na působení točivého magnetického pole, které je vytvořeno statorovým vinutím napájeným trojfázovým proudem. Točivé magnetické pole charakterizuje vektor magnetické indukce, který rotuje synchronními otáčkami. Ty závisí na frekvenci zdroje a počtu cívek statoru v jedné fázi, tj. počtu pólových párů. Ve vodičích rotoru se indukují proudy, točivé magnetické pole silově působí na vodiče rotoru a vytváří točivý moment. Rotor se otáčí menšími otáčkami než má točivé pole. Rozdíl mezi otáčkami točivého pole a otáčkami kotvy definuje tzv. skluz. Motory s kotvou nakrátko mají jednoduchou konstrukci a nepotřebují velkou údržbu. Skluz se zatížením roste, tj. otáčky klesají.



Obrázek 1.10: Třífázový motor