



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

# Opravář elektrických pohonů elektromobilů

Modul č. 2

**Zpracoval:**



**S přispěním:**



Učební modul vznikl v rámci projektu Kvalifikace pro třetí tisíciletí v elektrotechnice v programu Erasmus+, reg. č. 2016-1-CZ01-KA202-024017. Za obsah této publikace odpovídá výlučně autor. Publikace nereprezentuje názor Evropské komise a Evropská komise neodpovídá za použití informací, které jsou jejím obsahem.

## OBSAH

1	Úvod.....	1
1.1	Elektromobily a jejich funkce.....	1
1.2	Historie elektromobilů.....	1
1.3	Výhody elektromobilů.....	8
1.4	Nevýhody elektromobilů.....	8
2	Stejnoseměrné pohony.....	10
2.1	Stejnoseměrný motor s cizím buzením.....	11
2.2	Sériový elektromotor.....	12
2.3	Paralelní elektromotor.....	13
2.4	Kompaundní elektromotor.....	13
2.5	Stejnoseměrný motor bez kartáčů.....	14
2.6	Výhody a nevýhody stejnosměrných motorů.....	15
3	Střídavé pohony.....	16
3.1	Asynchronní motory.....	16
3.2	Synchronní motory.....	17
3.3	Řízený reluktanční motor.....	19
3.4	Porovnání nejrozšířenějších trakčních elektromotorů.....	21
4	Hybridní pohony.....	22
4.1	Porovnání účinnosti jednotlivých typů motorů.....	22
4.2	Sériové uspořádání.....	23
4.3	Paralelní uspořádání.....	24
4.4	Další dělení hybridních vozidel.....	24
4.5	Princip činnosti hybridního pohonu.....	25
4.6	Provozní režimy hybridních systémů.....	26
5	Akumulátory.....	28
5.1	Požadavky na trakční baterie.....	28
5.2	Princip baterií.....	29
5.3	Olověný akumulátor.....	30
5.4	Baterie Nikl-kadmium.....	31
5.5	Baterie Nikl-metalhydridová.....	33
5.6	Baterie lithium-iontová.....	34
5.7	Baterie lithium-železo-fosfátové (LiFePO).....	34
5.8	Baterie lithium-titan-oxid (LTO).....	35
5.9	Baterie vysokoteplotní.....	35
5.10	Vysokoenergetické kondenzátory - superkondenzátory.....	36
5.11	Nabíjení akumulátorů.....	37
6	Řízení pohonů.....	40
6.1	Stejnoseměrné cizí buzené motory.....	40

6.2	Asynchronní motory .....	41
7	Diagnostika závad .....	43
7.1	Měření izolačního odporu.....	43
7.2	Kontrola teploty pohonu .....	50
8	Bezpečnost práce.....	56
8.1	Ochrana před úrazem elektrickým proudem .....	56
8.2	Obsluha a práce na elektrických zařízeních.....	67
8.3	Odborná způsobilost v elektrotechnice.....	69
9	Seznam použité literatury.....	71

# 1 Úvod

## 1.1 Elektromobily a jejich funkce

Ze všeho nejdříve se nabízí otázka, co to vlastně elektromobily jsou a jak se liší od běžných aut se spalovacími motory. Jsou to vozidla poháněná elektrickou energií z baterií, palivových článků a někdy i ze solárních panelů. A zejména neobsahují tradiční komponenty: spalovací motor, výfukový systém, převodovku, zapalovací svíčky, spojku nebo třeba olej. Z toho plyne mnoho výhod, ale také nevýhod.

## 1.2 Historie elektromobilů

### 19. století ve světě

Elektrický proud je známý od roku 1800, kdy byl objeven první použitelný zdroj stálého elektrického proudu - Voltův článek. Během krátké doby v první polovině 19. století byla prozkoumána většina elektrických vlastností látek za normálních podmínek, byly objeveny zákony platící v elektrických obvodech a nalezena souvislost elektřiny s magnetismem. Nejvýznamnější jména té doby jsou Alessandro Volta, André Marie Ampere, Georg Simon Ohm, Hans Christian Oersted, Michael Faraday.

Bude těžké někomu přiřknout konkrétnímu vynálezci elektromobilu, neboť kolem roku 1800 byl každý druhý vynálezce poblázněný elektrickou energií. Za první impuls by se dal považovat rok 1828, kdy maďarský vynálezce Ányos Jedlik vynalezl prototyp elektrického motoru a ihned ho napadlo tento motor postavit na čtyři kola.

Roku 1835 se v Holandsku a téměř současně v Itálii objevily první elektromobily se zdrojem, který si auta vezly sebou. První auto na elektrický pohon zkonstruoval holandský profesor Sibrandus Stratingh. Tento fakt je o to zajímavější, že první automobil na spalovací motor sjel z linky až téměř 50 let poté.

V roce 1859 francouzský fyzik Gaston Planté vynalezl olověné baterie, kterou bylo konečně možno nabíjet. Olověná baterie byla tak nadčasová, že jí v podstatě beze změn používáme dodnes. Olověný akumulátor přidal násobně větší kapacitu, což byl perfektní základ pro dosažení rychlosti a dojezdu, které byly v elektromobilech do té doby nepředstavitelné.

Bohužel první akumulátory byly neúměrně drahé a svou hmotností značně zvyšovaly hmotnost vozu a poměrně malou kapacitou zmenšovaly jeho upotřebitelnost.

Přesto elektromobil lákal. Byl jednoduchý na konstrukci, byl relativně tichý, neznečistoval ovzduší, i když v té době to nebylo primární. Elektromotory se rozmísťovaly buď poblíž zadní nápravy, aby se každé kolo mohlo nezávisle otáčet a tím odpadl složitý diferenciál, nebo přímo do nábojů každého z kol jako volnoběžné stroje.

## František Křižík a elektromobil

Mezi první konstruktéry elektromobilu na světě patří také český elektrotechnik a významný vynálezce, Dr. Ing. František Křižík (1847-1941), původem z Plánice v západních Čechách. Vynálezu olověné baterie si všiml i on. Psal se rok 1895, kdy dokončil svůj první elektromobil, poháněný pětikoňovým (3,7 kW) elektromotorem přes planetové soukolí na zadní nápravu. Původně se vůz řídil pákou, kterou následně vystřídal volant, pohyb vpřed pak řidič kontroloval klasicky pedály. Potřebné akumulátory byly uloženy v zadní části vozu.

Brzdilo i akcelerovalo pedály a navíc měl pásovou brzdu na předloňový hřídel.

Další model Křižíkova elektromobilu poháněly dva elektromotory, každý o výkonu 2,2 kW (3 k), působící na zadní kola. Aby prodloužil dojezdovou vzdálenost, umístil do vozu i benzínový motor pohánějící dynamo, které dobíjelo akumulátory.

S podobným řešením benzíno-elektrického pohonu přišel později ve Vídni konstruktér Jakub Lohner s konstruktérem Ferdinandem Porschem. Proto jejich vůz nesl označení Lohner-Porsche.

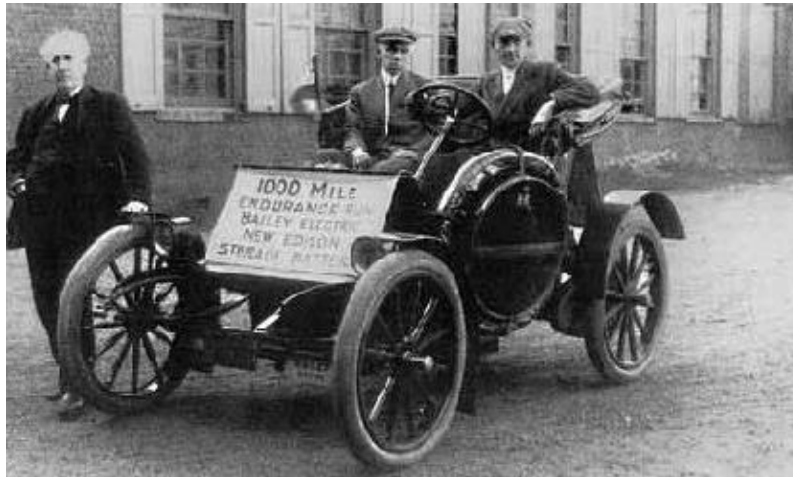
## Přelom 19. a 20. století - další pokusy s elektromobilem

I v Rusku se tou dobou tvořila slušná konkurence. Další elektrotechnik, I. V. Romanov, v roce 1899 představil svůj dvousedadlový stroj dosahující rychlosti až 35 km/h s dojezdem až 60 kilometrů. V roce 1881 byl vyroben ve Francii první úspěšný elektromobil. Jeho autorem byl inženýr N. J. Raffard, který zkonstruoval elektrickou tramvaj pro 31 pasažérů. Její hmotnost byla 8 600 kg, pohybovala se rychlostí 12 km/hodinu a na jedno nabití byla schopna urazit až 40 km.

V USA elektromobily od roku 1891 vyráběla firma Holtzer Cabot Electric a do roku 1915 bylo ve Spojených státech vyrobeno více jak 35 000 elektromobilů. Elektromobily měly po roce 1900 již konkurenci v dnes klasických automobilech se spalovacím motorem a ve vozech poháněných párou. Na začátku dvacátého století jezdilo po USA více elektromobilů než automobilů se spalovacím motorem.

## První sériově vyráběné elektromobily

Jedním z prvních sériově vyráběných elektromobilů byl vůz od americké společnosti Baker Motor Vehicle. Společnost se tehdy chlubila titulem „Největší výrobce elektromobilů na světě“. Vozidlo, které vyráběli od roku 1899 do 1915, nabízelo dojezd až 80 km s maximální rychlostí 23 km/h. Vůz Baker Electric si mohli Američané pořídit za tehdy poměrně vysokou částku 2 300 dolarů (cca 53 700 Kč). V dnešní době by vůz stál cca 63 300 dolarů, tedy asi 1 480 000 Kč.



**Obr. 1.01: Vůz Baker Electric**

### Rychlost prvních elektromobilů

Na prvním rychlostním rekordu elektromobilu má zásluhu konstruktér Francouz Jeantaud a hrabě Chasseloup - Laubat. Francouzský hrabě spálil ve svém voze postupně tři elektromotory, než se mu podařilo svůj původní rekord z roku 1898 - 63 km/h posunout na 92,24 km/h. Elektromobil dokonce jako první vozidlo na světě překonal stokilometrovou rychlostní hranici. Camille Jenatton odpověděl 29. dubna roku 1899 vytvořením nového rekordu rychlostí 105,882 km/h, který nebyl tři roky překonán. Jeho rekordní vůz Jamais Contente se podobal doutníku a z hliníkové karosérie jezdec vyčníval téměř celým tělem.



**Obr. 1.02: Vůz La Jamais Contente**

Elektromobil Torpédo KID dosáhl v roce 1902 dokonce rychlosti téměř 170 km/h.

## Rušení výroby elektromobilů

Objev nových ložisek ropy razantně snížilo cenu benzínu a naftařská loby vycítila příležitost, jak velmi razantně zbohatnout, pokud se benzin začne plošně používat. Společnosti těžící naftu samozřejmě tíhly k tomu, aby se benzin začal globálně využívat. V roce 1912 Charles Kettering vynalezl elektrický startér, který znamenal revoluci v komfortu. Odstranil nepohodlné a fyzicky náročné startování klikou, což byla značná nevýhoda vůči elektromobilům. Již nebyl velký rozdíl při startování benzinového a elektrického vozidla. Nepohodlné, fyzicky náročné a často i nebezpečné startování klikou zůstalo nutností jen pro pár mrazivých zimních měsíců.

Po vyřešení problému s klepáním motoru (přidáním olova do směsi) naftařská lobby iniciovala postupně schválení řady zákonů a pomocí reklamy a ceny přesvědčila veřejnost, aby po dobu skoro sta let dobrovolně a radostně používala a dýchala rakovinotvorné zplodiny olovnatého benzínu. A to i přesto, že v té době existovala reálná možnost místo olova používat ethanol.

Nízká maximální rychlost, která se pohybovala mezi 24 až 32 km/h a malý dojezd 50 až 65 km u elektrických automobilů přestával být pro zákazníky zajímavý. Naproti tomu spalovací motory zaznamenávaly i nadále růst prodejů. Výkony rostly a ceny klesaly.

Hlavní impulz pro rozvoj aut se spalovacím motorem měla firma Henry Ford, která zahájila hromadnou výrobu vozidel se spalovacími motory za velmi dostupné ceny (500 – 1000 dolarů). Tím se tato auta stala dostupná pro všechny. Pro porovnání – benzinový automobil bylo možné pořídit za 650 dolarů, adekvátní elektrický roadster za 1750 dolarů.

Hlavní výhodou elektromobilů zůstávala tichost. Ticho a čistý vzduch okolo elektromobilu působil jako oáza klidu vedle špatně vyladěných kouřících osmiválců. To však nestačilo, navíc v té době rychle rostoucí průmysl zastavila 2. světová válka.

## 20. století - elektromobily jako kuriozita a nutné zlo „hubených“ období

Postupné vyřešení základních neduhů spalovacích motorů a nástup masové výroby vedl k motorizaci čím dál širších vrstev obyvatelstva. Elektromobily se však na tomto rozvoji téměř nepodílely, nebereme-li v potaz průmyslová vozítka či městskou hromadnou dopravu.

Bylo to období, kdy elektromobilům hrála do karet pouze palivová otázka a možnost předvést něco neobvyklého. Důkazem toho byl vznik omezených sérií elektromobilů v dobách nutnosti překonat období ztíženého přístupu k ropě (2. světová válka, Sinajská válka, 70. léta 20. století a období tzv. ropných šoků). Plošně nepodporovaný výzkum vedl k tomu, že kdykoli musely být elektromobily vyrobeny, koukalo se na ně pro jejich omezené výkony přes prsty jako na nutné zlo.

Zejména ropné krize let 1973 a 1979 však již s obecným povědomím zatřáslly a přinutily automobilky a vědecké týmy začít se, byť jen na úrovni testovacích vozů, k práci na elektromobilech postupně vracet.

O tom, že nedostatky v zásobování ropou měly celosvětové následky, svědčí i činnost Československa, které dostalo za úkol vyvinout pro země RVHP malé rodinné elektrické auto, později nazvané EMA.

I když žádný ze zejména v Evropě nastartovaných projektů automobilky do hromadné výroby nevedly, vývoj v této oblasti již nebyl ignorován. Na opravdový průlom v návratu k elektromobilitě, ať už osobní, anebo hromadné, však došlo až v okamžiku, kdy se k obavám o vzniklé závislosti na dovozu ropy přidaly dopady ze znečištění výfukovými zplodinami v našem nejbližším okolí.



**Obr. 1.03: Peugeot VLV - lidový dvoumístný elektromobil jako odpověď na nedostatek benzínu během války**



**Obr. 1.04: Lunar Rover - zde to již s Ottovým spalovacím motorem doopravdy nešlo**



## Přelom 20. a 21. století - jasný elektromotor, nejasný zdroj energie

Nad tím, že pohonem budoucnosti je elektromotor, panuje při pohledu na zprávy napříč automobilovým průmyslem poměrný konsenzus. Současnou otázkou spíše je, jaký zdroj energie bude elektromotory ve vozidlech napájet.

Dlouho vyvíjený koncept přímého spalování vodíku v upravených Ottových motorech byl hlavními tahouny této myšlenky, BMW a VW, nedávno zastaven. Zatímco v hojně diskutované a progresivní Tesle Motors se vydali cestou sportovních elektromobilů napájených - čistě z baterií, většina z automobilek zvučných jmen vsází na cestu tzv. hybridů.

Důvod je zde jasný: koncept těchto motorových míšenců nejčastěji kombinujících elektromotor se spalovacími či vznětovými motory nabízí zákazníkovi větší dojezd, automobilkám a na ně napojenému průmyslu zase umožní amortizaci výroby spalovacích motorů a jejich periférií. Hojně diskutovaná otázka palivových článků (PČ) na vodík, tedy malých laboratoří na výrobu energie umístěných přímo na palubě vozidel, je zatím ve své proveditelnosti příliš náročná, a to zejména z důvodů ceny palivových článků a nedostupnosti levného vodíku.

Přesto, jak ukazuje historie též na počátku velmi nedokonalých spalovacích motorů, o celkové nevhodnosti využití palivových článků v osobní dopravě je zatím ještě příliš brzo mluvit. Pro velkou energetickou účinnost elektromotorů (až 97 %), možnost rekuperace, atd., začínají prolínat zprávy o pochybách velkých energetických společností o výnosnosti elektromobilů. O mnoho zajímavější by z tohoto hlediska mohla být naopak energeticky více než nešťastná, ale finančně kynoucí výroba a distribuce vodíku. Základem je prosazovat, aby elektrická energie zásobující elektromotory našich vozidel pocházela z obnovitelných zdrojů.

Zbývá tedy jen uzavřít: Elektromotor jasný, zásobník energie nikoliv.



Obr. 1.05: Důkaz o průběžném vývoji prototypů elektromobilů automobilkami



**Obr. 1.06: Proslavený elektromobil GM EV 1 při svém uvedení v roce 1996**



**Obr. 1.07: Srdce EV 1, karoserie Lotus -  
zachráníce dvoustupých elektromobilů = Tesla Roadster**

## 21. století - Tesla a její komerční úspěch elektromobilů

Z okraje zájmu pomohla elektromobily dostat americká společnost Tesla Motors, která se kromě výroby elektroaut zabývá také solárními panely a úložišti elektrické energie. Za vším stojí výkonný ředitel Elon Musk, známý vizionář, který založil mimo jiné i firmu SpaceX, tedy jednu z prvních soukromých kosmických společností.

Elektromobily Tesla X a Tesla S, které začala firma vyrábět v letech 2008 a 2012, dnes patří mezi nejznámější elektrické vozy s celosvětovou úspěšností. Další automobilky ale nezaostávají a v současnosti si můžete pořídit například elektroauto značky BMW, Volkswagen, Hyundai, Nissan nebo Renault. Ani tuzemská Škoda nechce být pozadu a v oblasti elektromobilů se hodlá rovněž angažovat. Oznámila například plány pro svůj budoucí elektromobil s označením Vision E.



Obr. 1.08: Elektromobil s označením Vision E

### 1.3 Výhody elektromobilů

#### Životní prostředí

Elektromobily mají své nesporné výhody. Kvůli absenci celé řady komponentů mnohem méně znečišťují ovzduší než auta se spalovacími motory, nejsou tedy takovou přítěží pro životní prostředí. Navíc jsou prakticky bezporuchové a díky vysokému krouticímu momentu od téměř nulových otáček zajišťují velmi plynulou jízdu.

#### Snížení nákladů

Největším tahákem k pořízení elektroauta však pro mnoho lidí jsou snížené provozní náklady. Například když najezdíte za rok 30 000 km, provozní náklady budou necelou korunou na ujetý kilometr. Pro srovnání, ujetý kilometr v běžném autě vás vyjde na zhruba na 2 koruny, a to jen, pokud je auto úsporné. Celkové ušetřené náklady na provoz elektromobilu se tedy mohou po 5 letech používání vyšplhat až na 250 000 Kč. A to už je velmi lákavá částka.

### 1.4 Nevýhody elektromobilů

#### Omezený dojezd

Nic však není dokonalé a o autech na elektrický pohon to platí v nemalé míře. Mezi hlavní neduhy patří malý dojezd na jedno nabití baterie. Dojezd na jedno nabití se u levnějších modelů totiž pohybuje pouze mezi 100 až 200 km, což je velmi málo. Auto na spalovací motor přitom na plnou nádrž běžně ujede i více než 700 km. Premiantem ve výdrži baterie v elektromobilu je Tesla S, která bez připojení k zásuvce urazí až 466 km. To je zhruba polovina vzdálenosti v porovnání s klasickými automobily.

Ani síť dobíjecích stanic na našem území momentálně není příliš hustá. Podle údajů z roku 2016 se v Česku nachází jen asi 248 dobíjecích stanic pro elektromobily. Letos však vláda oznámila, že chystá toto číslo do roku 2020 zvýšit až o 1 200 stanic. Je to určitě potěšitelný fakt, s tradičními benzínovými pumpami se to ale stále nedá srovnávat. Těch se podle Ministerstva průmyslu a obchodu u nás v současnosti vyskytuje více než 7 000.



Obr. 1.09: Dobíjecí stanice

### Vyšší pořizovací cena

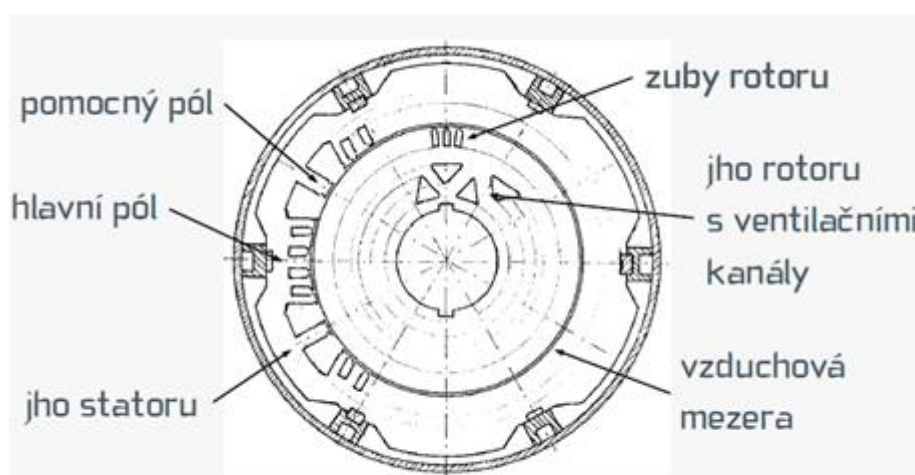
Odrazovat od nákupu elektromobilů může také jejich vyšší cena. Ty se samozřejmě liší mezi značkami a modely, v průměru jsou ale elektroauta 2× až 3× dražší než jejich benzínové a dieselové protějšky ve stejné kategorii. Pokud ceny v dohledné době neklesnou, i nadále si elektroauta v drtivé většině budou pořizovat jen uživatelé s nadprůměrnými příjmy.



## 2 Stejnoseměrné pohony

Stejnoseměrný motor patří mezi nejstarší motory. Jako každý motor se stejnoseměrné motory skládají ze statoru a rotoru. Stator může být tvořen permanentními magnety, nebo póly. Póly jsou přišroubované ke kostře a na konci jsou rozšířené pólovými nástavci. Na pólech je pak navinuto budící vinutí.

Dále tam mohou být pomocné póly a pomocná vinutí. Rotor je složen z plechů s drážkami, ve kterých je umístěné pracovní vinutí. V plechách také bývají ventilační otvory. Na rotoru je nasazen komutátor, na který dosedají uhlíkové kartáče, kterými se do rotoru přivádí proud.

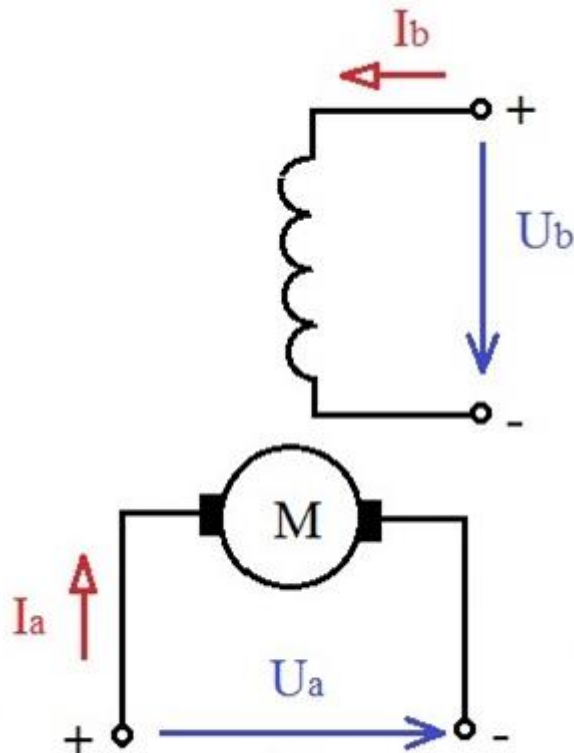


Obr. 2.01: Magnetický obvod stejnoseměrného motoru

Magnetické pole vybuzené budícím vinutím ve statoru působí na magnetické pole vytvořené v rotoru díky přivedenému proudu do pracovního vinutí přes kartáče a komutátor, který zajišťuje periodickou změnu proudu do cívky, kotvy, takže indukované pohybové napětí vytváří točivý moment, který působí stále ve směru rotace.

Podle způsobu zapojení budícího vinutí a kotvy je můžeme rozdělit na motory s cizím buzením, nebo s vlastním buzením. Motory s vlastním buzením dále rozlišujeme na motory sériové, paralelní (derivační) nebo sérioparalelní (kompaundní).

## 2.1 Stejnosměrný motor s cizím buzením

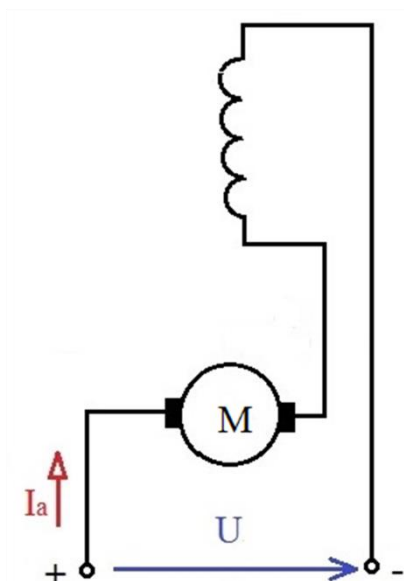


Obr. 2.02: Schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením

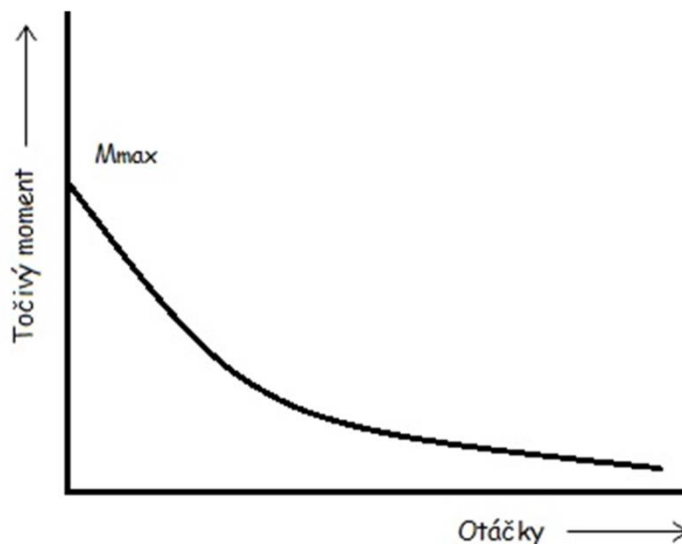
Budící vinutí je napájené z cizího zdroje, např. akumulátoru. Regulace se provádí napětím na rotoru a budícím proudem. Stejnosměrný motor s cizím buzením má tvrdou momentovou charakteristiku, která vykazuje zvláště výhodné tahové vlastnosti. Výhodou je jednoduchá a plynulá regulace otáček v širokém rozsahu a kontinuální přechod z jízdy na brzdění. Má však nižší záběrový moment.

Při vysokém napětí celého systému motoru je docíleno vyšší účinnosti, díky nižším poklesům napětí na kartáčích. Dále při vysokém napětí mohou být menší proudy na motoru a spojovacím vedení, což přináší výhody i ve snižování hmotnosti, menšímu objemu a nižších výrobních nákladech. Tyto motory jsou silně přetížitelné. Pro trvalý výkon po dobu jedné hodiny je přetížitelnost 20 % nad trvalým výkonem. Při rozjezdu je přetížitelnost krátkodobě i 100 %. Již dlouhou dobu jsou používány u elektrických vozidel, kde mohou být napájeny přímo z baterie.

## 2.2 Sériový elektromotor



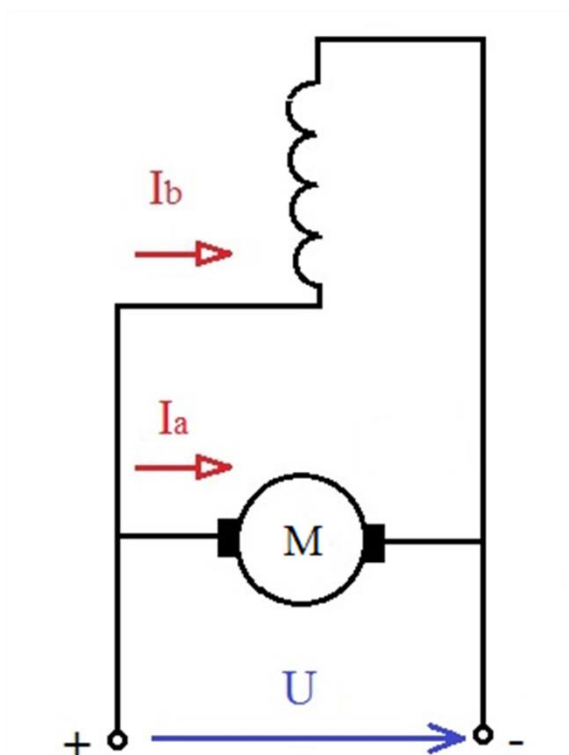
Obr. 2.03: Schéma sériového stejnosměrného motoru



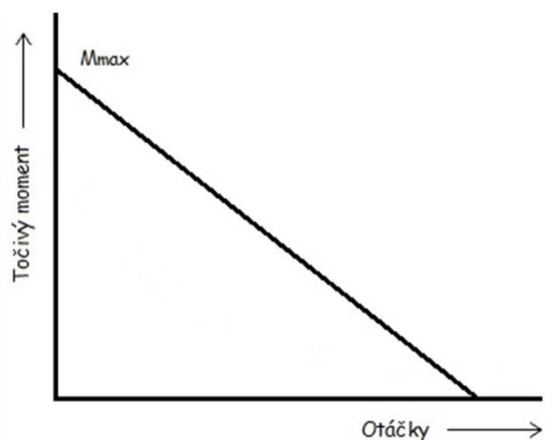
Obr. 2.04: Momentová charakteristika sériového elektromotoru

Budící vinutí je zapojeno sériově s kotvou, takže její proud je zároveň proudem budícím. Tento motor má nejjednodušší regulaci. Jeho napětí je úměrné požadované hodnotě proudu tak, že regulátor výkonu řídí napětí akumulátoru v proměnném spínání nebo proměnné frekvenci. Sériový elektromotor má dobrý počáteční točivý moment, avšak momentová charakteristika je velmi měkká. Točivý moment rychle klesá se stoupajícími otáčkami. Při odlehčení vzrostou otáčky natolik, že hrozí poškození elektromotoru. Proto nesmí pracovat bez zatěžovacího momentu na hřídeli. Kvůli velkému točivému momentu při nízkých otáčkách a samočinně se přizpůsobujícím otáčkám podle zatížení se používá u elektromobilů a vozidel elektrické trakce (vlaky, metro, tramvaje)

## 2.3 Paralelní elektromotor



Obr. 2.05: Schéma paralelního stejnosměrného motoru



Obr. 2.06: Momentová charakteristika paralelního elektromotoru

Budící vinutí a obvod kotvy je připojen ke zdroji paralelně přes samostatné regulační prvky. Lze ho snadno a plynule regulovat, ale v menším rozsahu než stejnosměrný motor s cizím buzením. Mají tvrdší momentovou charakteristiku. Točivý moment klesá pomaleji, a sice lineárně s otáčkami. Elektromotor se také jednoduše brzdí. Z těchto důvodů se tento typ elektromotoru používal u většiny elektrovozidel

## 2.4 Kompaundní elektromotor

Kompaundní elektromotor má jedno budící vinutí zapojené v sérii a druhé paralelně ke kotvě. Tím kombinuje výhody obou předchozích elektromotorů. Sériové vinutí je zapojeno magneticky souhlasně s derivačním vinutím a při zatížení motoru způsobuje snížení otáček a zvětšení momentu. Derivační vinutí naopak omezuje otáčky na prázdko.



## 2.5 Stejnoseměrný motor bez kartáčů

Bezkartáčový stejnosměrný motor má, v porovnání s konvenčním permanentně buzeným stejnosměrným motorem, vyměněné pozice rotoru a statoru. Ve vnějším statoru, kde jsou jinak permanentní magnety, se nalézají vinutí, permanentní magnety jsou v rotoru. Stavba je tedy podobná permanentně buzenému synchronnímu motoru.

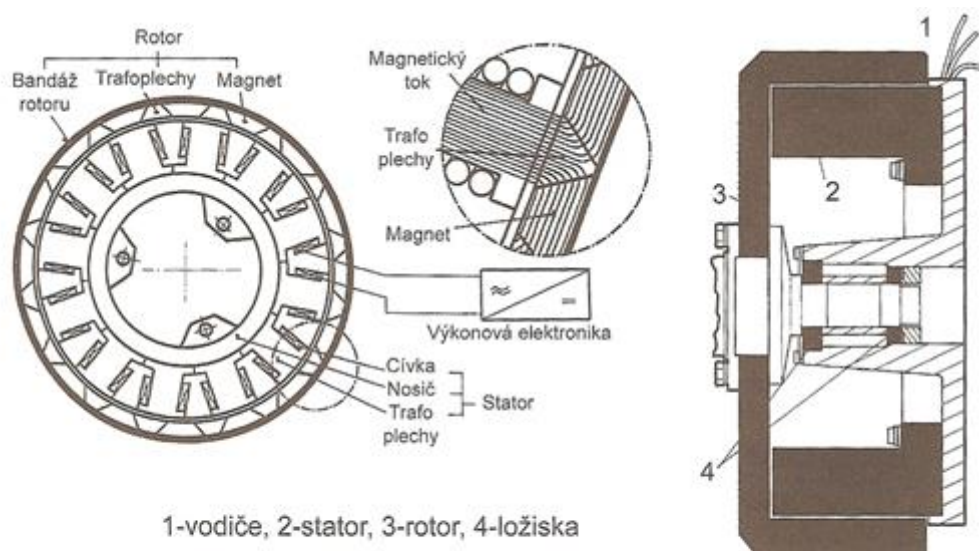
Komutátor zajišťuje napájení vinutí statoru pulzně modulovaným stejnosměrným proudem. Tím se sníží náklad na elektronickou komutaci, neboť je většinou vinutí statoru složeno jen ze tří nebo ze čtyř svazků závitů. Jednotlivé svazky jsou tak seřizeny, že hustota toku statoru a rotoru je přibližně fázově posunuta o  $90^\circ$ . Tímto zabezpečením je poloha rotoru pevně stanovena.

Obvykle se k tomu používá Hallových sond, optoelektronického systému nebo magnetoresistenčního systému. Bezkartáčové stejnosměrné motory mají nejen další vinutí výkonové elektroniky, nýbrž také nové permanentní magnetické materiály jako neodým-železo-bor a samarium-kobalt. Posledně jmenované jsou dosud relativně drahé.

Pokrokově řešení poslední doby je provedeno firmou Magnet-Motor, které vyniká v jednoduchosti konstrukce, s vynikajícími elektrickými parametry při malé hmotnosti a stavebních rozměrech. Motor náleží ke skupině elektronické komutace synchronních motorů s permanentním buzením.

Pro všechny elektromotory platí, že dosahovaný moment je úměrný magnetické indukci ve vzduchové mezeře, k axiální délce rotoru a ke kvadrátu poloměru vzduchové mezery. Vzhledem ke kvadratické závislosti momentu na poloměru vzduchové mezery je výhodná konstrukce vnějšího rotoru.

Tento rotor je složen z vylisovaných elektroplechů v nichž se nachází tangenciálně magnetizované oddělené magnety (neodým-železo-bor) se střídavou polaritou. Motor tedy nemá žádné rotující elektrické součásti. Uvnitř se nachází stator, který je složen z lisovaných elektroplechů a tvoří vysokopólové nosiče cívek. Cívky jsou spojeny s výstupem výkonové elektroniky, která proudy do statorového vinutí komutuje tak, že se motor chová jako stejnosměrný motor s cizím buzením. Je to tzv. elektronická komutace. Regulace je jednoduchá a dokonalá v celém rozsahu otáček až do  $n = 0$ . Vzhledem až k desetinásobku zvětšení výkonu oproti konvenčnímu provedení elektromotoru je statorové vinutí chlazeno kapalinou. Dále je motor až 4 x lehčí než konvenčního provedení a menší.



**Obr. 2.07: Schéma a řez motorem firmy Magnet-Motor**

## 2.6 Výhody a nevýhody stejnosměrných motorů

Stejnoseměrné motory se využívají díky snadnému řízení rychlosti a vhodným dynamickým vlastnostem. Mají však nižší výkon a energetickou účinnost, náročnější údržbu a jsou dražší.

### Výhody stejnosměrných motorů:

- technicky vyzrálé
- jednoduše řízené
- cenově výhodné

### Nevýhody stejnosměrných motorů:

- komutátor a kartáče jsou náchylné k poruchám a musí být udržovány
- maximální obvodová rychlost je omezena rotační frekvencí cca na  $7000 \text{ min}^{-1}$
- účinnost a hustota výkonu je menší než u střídavých motorů

K regulaci všech předchozích typů elektromotorů je použito elektronické regulace napájení vinutí motoru pomocí křemíkových tyristorů s pravoúhlým průběhem napětí. Zvolená střední hodnota proudu se nastavuje změnou frekvence a amplitudy. Pro brzdění v rozsahu regulace pole postačuje zvýšení buzení pole. Napětí motoru proto stoupá nad napětí baterie, a tím způsobem je přes diody dodávána energie zpět do baterie.

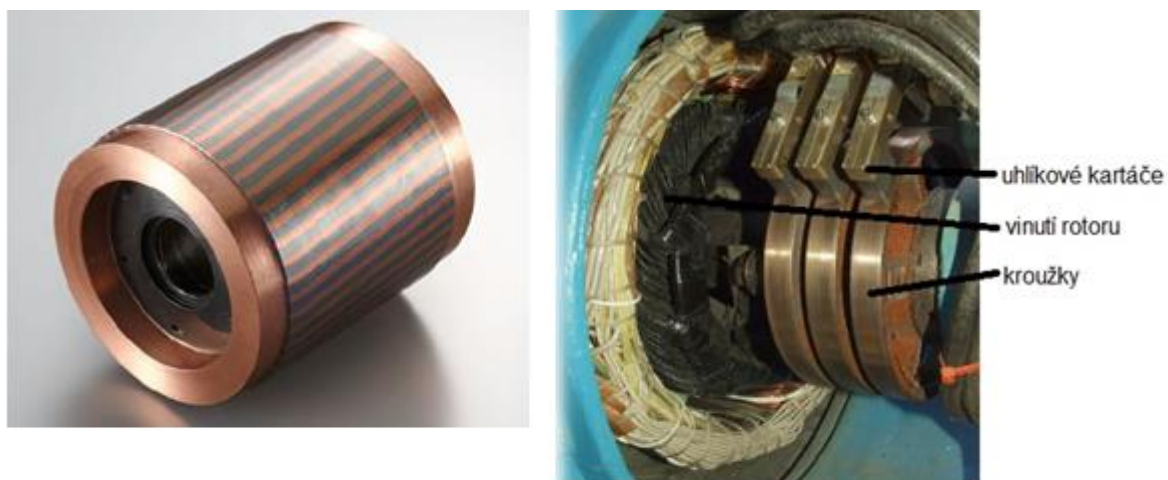
### 3 Střídavé pohony

Střídavé motory vytlačují u elektrovozidel stále více stejnosměrné motory. Velká výhoda střídavých motorů oproti stejnosměrným je, že obíhajícímu rotoru většinou nemusí být přiveden žádný proud, neboť ten je vybuzen rotujícím magnetickým polem. Vlivem působení indukovaného proudu působí síly magnetického pole na kotvu, která se otáčí.

Podle toho, jestli se rotor otáčí asynchronně nebo synchronně s točivým polem statoru, rozdělují se na asynchronní motory a synchronní motory.

#### 3.1 Asynchronní motory

Podstatná výhoda třífázového asynchronního motoru je v tom, že odpadá komutátor. Stator je složen z elektrotechnických plechů, protože jimi prochází časově proměnný magnetický tok. Na pólech nebo drážkách je umístěné třífázové statorové vinutí. Rotor může být proveden jako klecový, nebo kroužkový. Klecový rotor je složen z tlustých hliníkových, bronzových nebo měděných tyčí spolu spojených nakrátko. Vnitřek je vyplněn transformátorovými plechy. Kroužkový rotor je opatřen vinutím, kterým protéká proud přiváděný uhlíky a kroužky z vnějšku. U této konstrukce leží odpory za vinutím rotoru, a tak lze měnit pracovní podmínky.



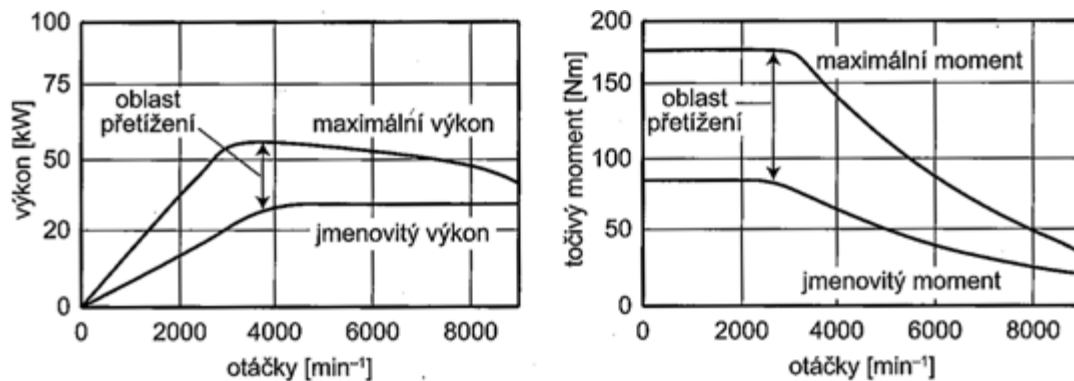
Obr. 3.01: Klecový a kroužkový rotor asynchronního motoru

U asynchronních motorů je magnetický tok do statoru přiváděn budícím vinutím, avšak rotačním napětím proměnné amplitudy a frekvence, která musí být odvozena ze stejnosměrného napětí trakční baterie. Stejnosměrný proud akumulátoru je tedy nutno přeměnit na střídavý. Obvykle se toho docílí cyklickým zapínáním tyristoru, přitom se pravoúhlý průběh mění přibližně na sinusový.

Statorové vinutí je složeno nejméně ze tří svazků, pootočených vzájemně o  $120^\circ$ , napájeno je třífázovým střídavým proudem. Alternativou může také být  $3n$  svazků ( $n$  je celé číslo), vzájemně přesazených o úhel  $120^\circ/n$ . Toto vinutí vyvozuje točivé magnetické pole

s kruhovou frekvencí střídavého proudu  $\omega$ , případně při  $n$  svazcích s kruhovou frekvencí  $\omega/n$ , tzn., že se otáčí prostorově proti skříni motoru.

Oproti stejnosměrnému motoru je asynchronní motor při stejném výkonu podstatně menší a lehčí, proto lze počítat s výkonovou hmotností asi 1 kg/kW. Motor je dále jednodušší konstrukce, robustní, bezúdržbový a silně přetížitelný, může dosáhnout až 20000 otáček/min.



Obr. 3.02: Výkonová a momentová charakteristika asynchronního motoru

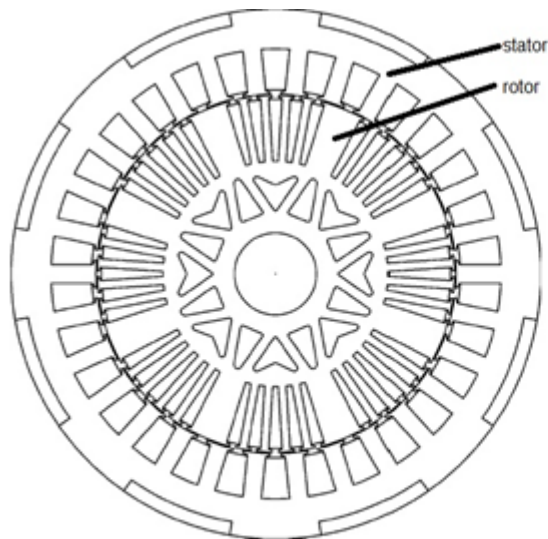
K regulaci tahové síly a otáček motoru musí být proměnná frekvence i napětí. Splnění těchto regulačních požadavků vyžaduje vysoké náklady na výkonový obvod. Zpětné získání energie při brzdění je možno realizovat s vysokou účinností.

### Transversální motor

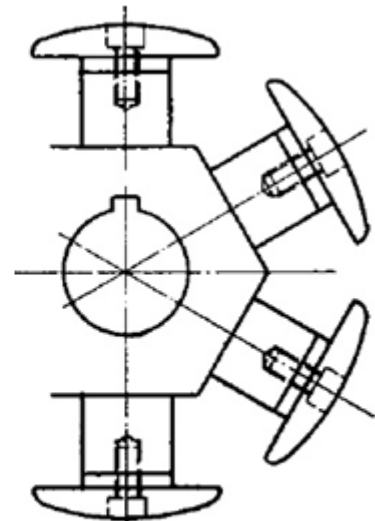
Jedná se o zvláštní tvar střídavého asynchronního motoru. U tohoto motoru je proud přiváděn v obvodovém směru do rotoru a magnetický tok statoru není kolmý k ose rotoru, ale je paralelní.

## 3.2 Synchronní motory

U synchronních motorů souhlasí kruhová frekvence s obíhajícím magnetickým polem. Podle způsobu buzení rotoru rozeznáváme rotory s budícím vinutím nebo buzené permanentními magnety. U prvního je rotor opatřen vinutím, které je napájeno stejnosměrným proudem. Rotor může být hladký, nebo s vyniklými póly.



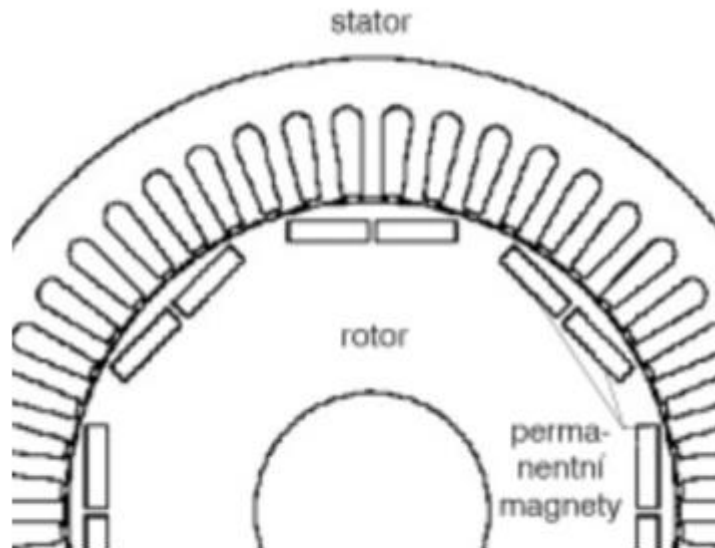
**Obr. 3.03: Hladký rotor**



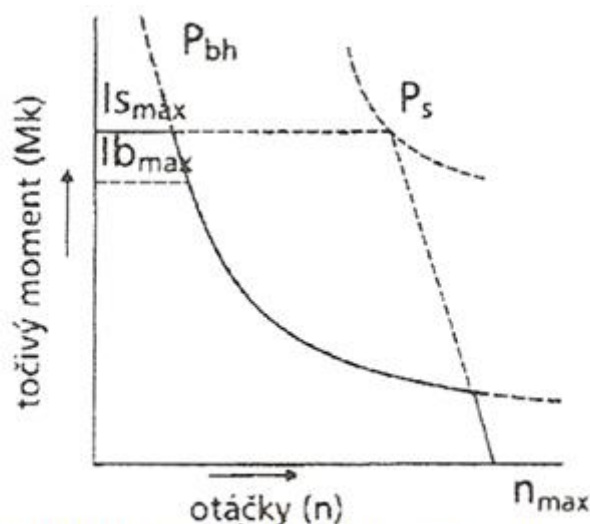
**Obr. 3.04: Vyniklé póly**

Tato konstrukce má výhodu, že je dosaženo velkého rozsahu konstantního maximálního výkonu, v důsledku změny stejnosměrného proudu.

U permanentně buzených synchronních motorů je magnetické pole v rotoru buzeno permanentními magnety, tedy bez potřeby přídavné elektrické energie. Výhodou je malý zastavěný objem motoru a vysoká účinnost.



**Obr. 3.05: Synchronní stroj s permanentními magnety**



Obr. 3.06: Momentová charakteristika synchronního motoru

#### Výhody střídavých motorů:

- jsou technicky dokonalé
- jsou kompaktní a robustní stavby, a tím bezúdržbové
- umožňují vysoké otáčky
- mají vysokou účinnost jako stejnosměrné motory

#### Nevýhody střídavých motorů:

- nákladné řízení
- vyšší cena

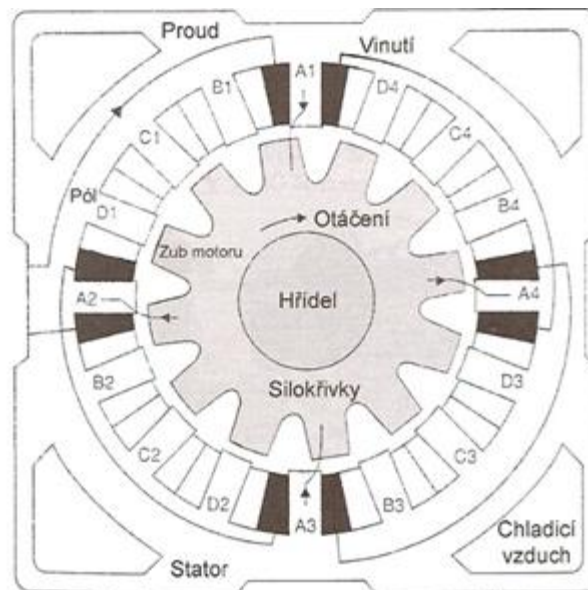
### 3.3 Řízený reluktanční motor

Reluktanční motory jsou založeny na dlouho známé technice reluktančních krokových motorů, kdy využívají změny magnetické vodivosti v závislosti na poloze rotoru. Ačkoliv lze reluktanční krokový motor jednoduše a levně vyrobit, byl mnoho desetiletí málo využíván pro jeho nerovnoměrnost, tj. závislost točivého momentu na poloze rotoru. Tato nevýhoda může být mezitím odpovídajícím řízením vyrovnána.

Rozlišujeme dva základní typy, reluktanční motor na principu synchronního stroje s vyniklými póly a tzv. spínaný reluktanční motor, jehož základem je elektromechanický měnič. První typ je synchronní stroj bez budícího vinutí a s rotorem upraveným tak, aby se maximálně lišily magnetické vodivosti. Spínané reluktanční motory jsou charakteristické tím, že bez spolupráce s elektronickými obvody nejsou schopny funkce, na rozdíl od ostatních elektrických strojů. Podle způsobu řízení mohou pracovat v krokovém režimu, nebo v režimu kontinuálního otáčení.



Reluktanční motor je zvláštní tvar střídavého motoru. Na statoru jsou jednoduché cívky napájené napětím jedné polaroty. V jeho rotoru není budící vinutí ani kluzné kontakty. Rotor z měkkého železa má pólové nástavce ve tvaru ozubeného kola.



**Obr. 3.07: Řízený reluktanční motor**

Princip spočívá v tom, že po zavedení proudu do odpovídajících cívek se rotor nastaví tak, aby magnetický obvod měl minimální magnetický odpor. Výkonovou elektronikou je možno otáčky a točivý moment reluktančního motoru velmi dobře ovlivňovat. Reluktanční motor se rozbíhá asynchronně, a pak běží synchronně.

Pojem reluktance poukazuje na magnetický odpor, který rotor v magnetickém poli představuje. Na základě bezhmotných mezer zubů v rotoru má rotor reluktančního motoru velmi malý moment setrvačnosti a tím velmi vysoké možnosti zrychlení.

#### Výhody reluktančních motorů:

- vysoký točivý moment při nízkých otáčkách
- vysoká účinnost
- robustní konstrukce
- malé náklady na údržbu
- stabilní chod motoru při vypnutí jedné nebo více fází
- vysoká přetížitelnost a malý ohřev
- vysoká účinnost a výhodná cena

#### Nevýhody reluktančních motorů:

- točivý moment není rovnoměrný (pulzační moment)
- vyšší emise hluku
- při vysokých otáčkách vysoké nároky na řídicí a výkonovou část

### 3.4 Porovnání nejrozšířenějších trakčních elektromotorů

V následující tabulce jsou porovnány nejrozšířenější trakční elektromotory a jak je patrné, všechny uvedené typy jsou vhodné pro pohon vozidel, zvláště pak motory synchronní. Nejlepší splnění dané vlastnosti je ohodnoceno číslem 10.

<b>motor</b>	<i>cena</i>	<i>účinnost</i>	<i>hmotnost</i>	<i>rozsah Pkonst</i>	<i>přetíži- telnost</i>	<i>spoleh- livost</i>	<i>stav vývoje</i>
<i>stejnoseměrný</i>	10	7	6	10	10	7	10
<i>asynchronní</i>	8	8	6	9	10	9	9
<i>synchronní</i>	8	10	7	10	10	9	8
<i>transversální</i>	7	10	8	8	10	10	7
<i>řízený reluktanční</i>	9	6	7	4	10	9	5
<i>stejnoseměrný bez kartáčů</i>	8	10	10	8	9	10	8

**Tabulka: Porovnání různých koncepcí trakčních elektromotorů**



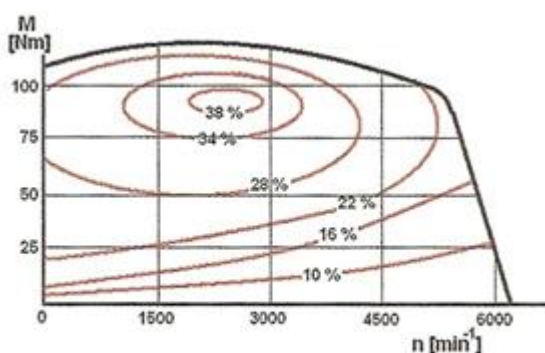
## 4 Hybridní pohony

Bateriová elektrická vozidla nemohou v současné době splnit požadavky uživatele. Jejich dojezd je nedostačující a účinnost a emise je závislá na druhu zdroje proudu. Elektromotor neemituje žádné škodliviny a je velmi tichý. V generátorickém režimu může kinetickou energii měnit v elektrickou. Má vysokou účinnost v širokém rozsahu otáček. Také spalovací motor může pracovat s vysokou účinností, ale jen v úzkém rozsahu výkonu a otáček. Energetická hustota paliva je mnohonásobně vyšší než akumulátory, což umožňuje kompaktní a lehkou stavbu. Nevýhodou je plnění legislativních požadavků ze stran emisí. Proto se možným řešením nabízí hybridní pohon.

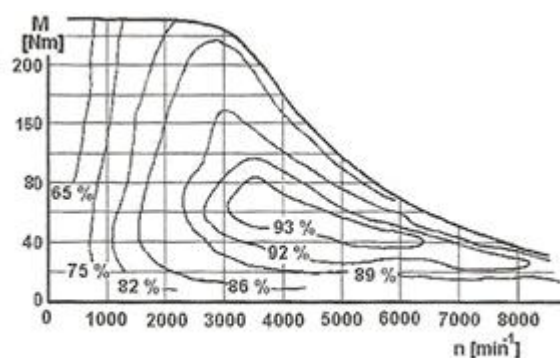
Slovem „hybridní“ se rozumí kombinace několika zdrojů energie pro pohon jednoho dopravního prostředku. Může se jednat např. o spalovací motor, elektromotor a akumulátor, palivový článek, elektromotor a akumulátor, spalovací motor a setrvačnický apod. Nejčastěji se používá kombinace spalovacího motoru, elektromotoru a akumulátoru.

### 4.1 Porovnání účinnosti jednotlivých typů motorů

Účinnost současných spalovacích motorů se pohybuje přibližně mezi 30 - 40 %. Zážehové motory mají účinnost spíše na spodní hranici pásma, vznětové motory jsou na tom o něco lépe. Tato hodnota je z větší části dána účinností samotného termodynamického cyklu, který má jasná fyzikální omezení. Nedá se tedy předpokládat výraznější vylepšení ani v budoucnosti. Problémem je, že tato účinnost je maximální a dosáhne se jí pouze tehdy, pokud motor pracuje v optimálních podmínkách. V městském provozu se dosahuje účinnosti značně pod 10 %. Jednoduchým výpočtem lze zjistit, že při průměrné rychlosti 30 km/h a spotřebě paliva 5 l/100 km, bude účinnost 6 %. Extrémním případem je provoz na volnoběh, kdy je celková účinnost nulová. Motor spotřebovává palivo, ale automobil nekoná žádnou práci. Naproti tomu současné elektromotory mají účinnost kolem 90 %, a to v širokém rozsahu otáček a zatížení. Ideálním řešením by proto byla konstrukce elektromobilů. Bohužel tomu brání příliš velká hmotnost potřebných akumulátorů a malý dojezd na jedno nabití.



Obr. 4.01: Účinnost spalovacího motoru



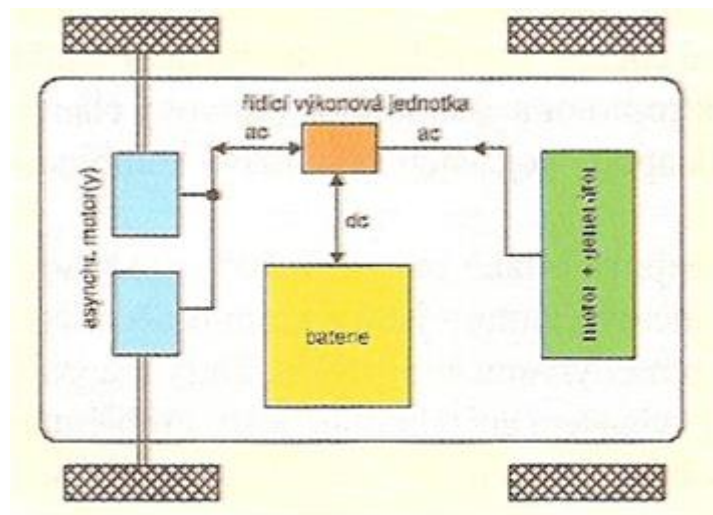
Obr. 4.02: Účinnost elektromotoru

Kombinace spalovacího motoru a elektromotoru vede k vlastnostem vozidla umožňujícího universální použití, tedy bezemisní pohon v oblastech zatížených škodlivými emisemi při velmi krátkých úsecích jízdy, kde má využití spalovacího motoru malou účinnost a meziměstský provoz se spalovacím motorem, při němž jsou vyšší výkony a velké dojezdy.

U hybridních vozidel lze uspořádání hnacího ústrojí rozdělit do dvou hlavních skupin, na sériové a paralelní.

## 4.2 Sériové uspořádání

Sériové hybridní vozidlo, podobně jako bateriové vozidlo, je poháněno výhradně elektromotorem. Jako zdroj energie je použit spalovací motor, který pohání generátor a vzniklým elektrickým proudem pak pohání trakční motory, případně dobíjí baterie. Jednotlivé poháněcí komponenty jsou vzájemně uspořádány za sebou.



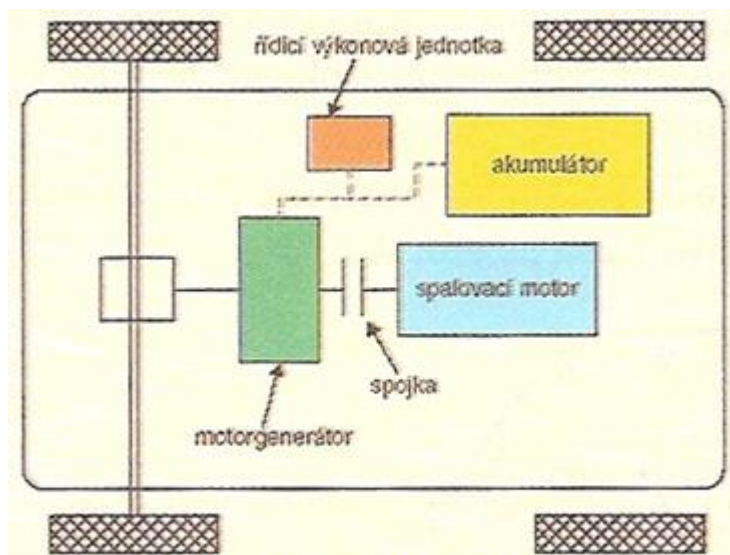
Obr. 4.03: Sériové uspořádání hybridního pohonu

Mechanické spojení spalovacího motoru pro pohon vozidla při sériovém uspořádání je možné při konstantních otáčkách jen v optimálním režimu provozu, vzhledem k účinnosti a emisím výfuku. Spalovací motor může být provozován ve velmi úzkém rozsahu otáček, nebo dokonce při jedné otáčce. Tím odpadají nevhodné body pracovní charakteristiky, jako je volnoběh nebo spodní rozsah částečných zatížení, motor tedy může být nastaven na optimální pracovní rozsah s nejvyšší účinností.

Baterie je značně menší než u elektrického vozidla na baterie. Jestliže baterie nemohou pokrýt momentální potřebu energie, je spalovací motor automaticky nastartován. Naproti výhodě sériového uspořádání je nevýhoda vícenásobné přeměny energie. Vzhledem k účinnosti nabití baterie je mechanická účinnost mezi spalovacím motorem a hnanou nápravou stěží větší než 55 %. Zcela výjimečně je snaha použít místo spalovacího motoru plynovou turbínu pro pohon generátoru.

### 4.3 Paralelní uspořádání

U většiny dnes prodávaných hybridních vozidel se používá paralelní uspořádání. Vůz je vybaven spalovacím motorem a elektromotorem, které jsou s koly propojeny skrze mechanickou převodovku. Častým uspořádáním je umístění elektromotoru / generátoru mezi spalovací motor a převodovku (např. Honda Insight a Civic).



Obr. 4.04: Paralelní uspořádání hybridního pohonu

Generátor plní funkci startéru a alternátoru. K akumulaci elektrické energie slouží baterie s výrazně větším napětím, než je v běžných automobilech (12 V). Kvůli zvýšení účinnosti spalovacího motoru bývají spotřebiče jako posilovač řízení či klimatizace poháněny elektromotorem. Tím jsou jejich otáčky nezávislé na otáčkách motoru, a navíc pokud zařízení nepracuje, není mu dodávána energie (filozofie BMW).

Dva zdroje energie jsou spojeny hřídelem a výsledný moment je dán součtem jejich okamžitých momentů. Pokud je tedy využíván pouze jeden motor, druhý rotuje s ním, aniž by dodával výkon (volnoběh), nebo může být odpojen přes spojku. U automobilů se častěji používá spojení přes planetovou převodovku. Obvyklým režimem paralelního hybridu je, že většinu výkonu dodává spalovací motor a elektromotor se zapojuje v případě akcelerace. Výhodou je možnost rekuperace.

### 4.4 Další dělení hybridních vozidel

Podle stupně „hybridizace“ rozeznáváme:

- Full hybrid
- Power assist hybrid
- Mild hybrid

## Full hybrid

Jedná se o hybridy, které jsou schopny jet pouze na elektrický pohon nebo mohou kombinovat jak spalovací, tak elektrický motor. To znamená, že jsou vybaveny děličem výkonu. Spalovací motor už nemá výsadní postavení a při výkonových parametrech srovnatelných s konvenčním vozem je menší (nižší objem). Je jím např. Toyota Prius či Lexus RX400h. Dalším krokem ke zdokonalení těchto hybridů je tzv. PHEV (Plug-in hybrid electric vehicle). Vůz je vybaven bateriemi umožňující dobíjení přímo ze sítě. Měřítkem u takových vozů je pak vzdálenost, kterou je schopen ujet bez použití spalovacího motoru.

## Power assist hybrid

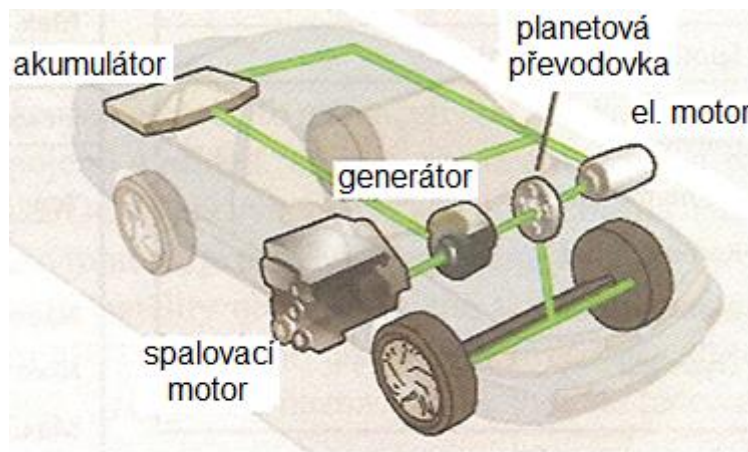
Spalovací motor je primární pohonnou jednotkou vozu. V případě potřeby akcelerace se připojuje elektrický motor, tzv. electric boost. Elektromotor je umístěn mezi motorem a převodovkou. Vůz je vybaven akumulátory, které jsou dobíjeny při jízdě z kopce, nebo brzdění. Čistě elektrický pohon není prakticky možný kvůli nízkému výkonu elektromotoru. Elektromotor zároveň pracuje jako generátor, např. při brzdění. Příkladem je Honda Civic se systémem IMA

## Mild hybrid

Nejedná se o oficiální název kategorie hybridních vozů, ale spíše o slovní obrat používaný marketingovými odděleními. Vůz je vybaven generátorem, který přebírá funkci startéru a alternátoru. Tyto vozy využívají tzv. stop-start režim. Při dojíždění ke křižovatce je spalovací motor vypnut, avšak ostatní spotřebiče jako klimatizace zůstávají v chodu. Pokud sundáte nohu z brzdového pedálu, spalovací motor opět naskočí a vůz je připraven k akceleraci. BMW šlo ještě dále a při plném zatížení motoru odpojuje alternátor, a naopak při nízkém zatížení je akumulátor dobíjen (navíc má větší kapacitu o 20 %).

## 4.5 Princip činnosti hybridního pohonu

Vzhledem k tomu, že paralelní hybridní pohony jsou v současné době předmětem většího zájmu, bude podrobněji popsána jejich činnost. Hlavní uplatnění se nachází u osobních automobilů. Uspořádání hlavních komponentů hybridního pohonu v osobním automobilu je znázorněno na obrázku.

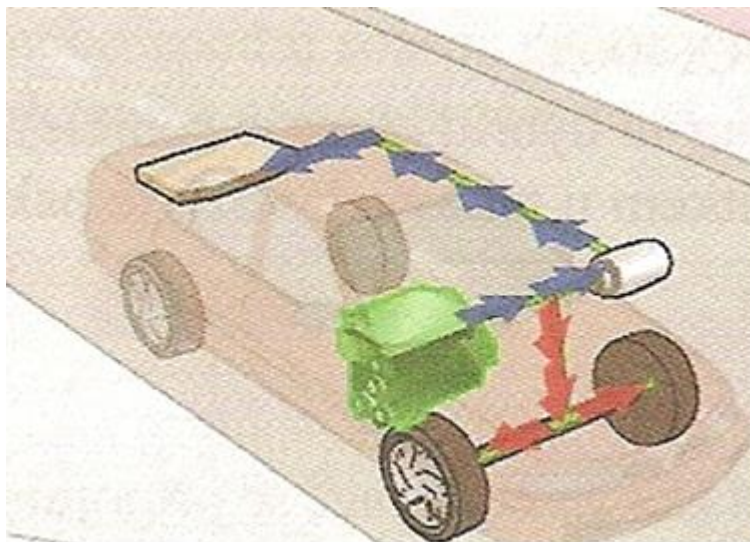


Obr. 4.05: Uspořádání hlavních komponentů hybridního pohonu



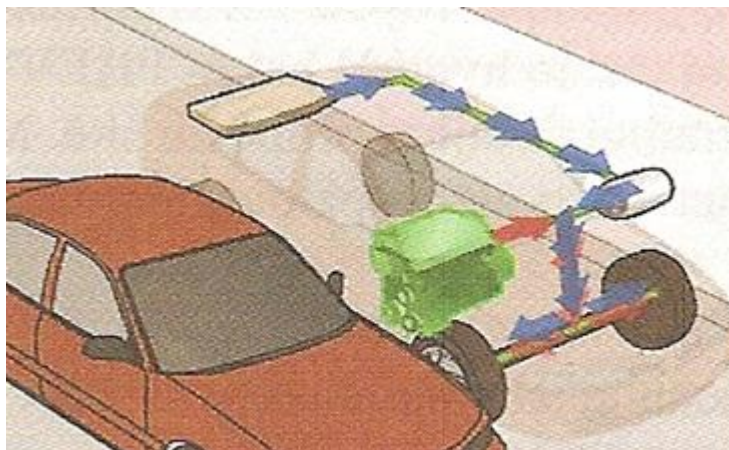
## 4.6 Provozní režimy hybridních systémů

Běžný provoz – pro pohon vozidla se využívá spalovací motor. Část energie spalovacího motoru se dobíjí baterie podle aktuálního stavu nabití baterií.



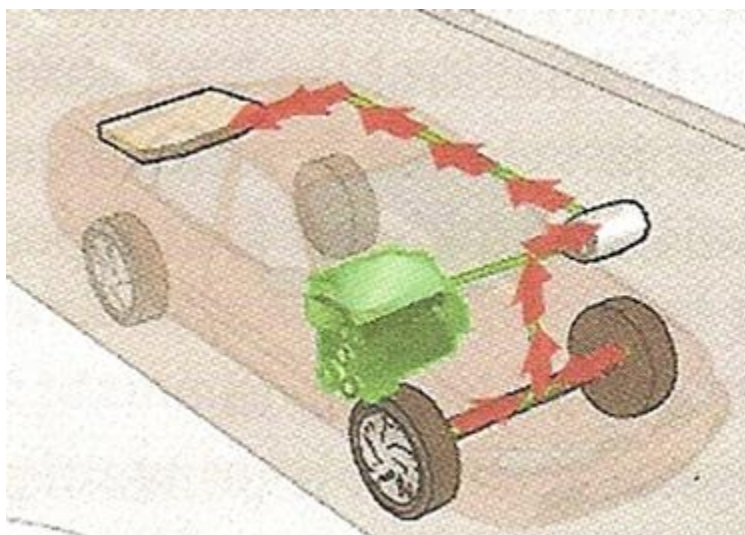
Obr. 4.06: Činnost při běžné jízdě

Akcelerace – při akceleraci např. při předjíždění je zapotřebí krátkodobé zvýšení výkonu pohonného agregátu. Pro pohon kol se využívá jak výkon spalovacího motoru, tak i výkon elektromotoru napájeného v této chvíli z akumulátoru elektrické energie.



Obr. 4.07: Činnost při akceleraci

Brzdění - při brzdění je kinetická energie vozidla přeměněna na elektrickou energii, kterou se dobíjí akumulátory vozidla. Samozřejmě je vozidlo vybaveno i hydraulickými brzdami aktivovanými při prudkém brzdění.



**Obr. 4.08: Činnost při brzdění**

Mezi důležitá kritéria hodnocení hybridních systémů je energetická hustota a výkonová hustota vztažená na jednotku hmotnosti, nebo na jednotku objemu. Energetická hustota Wh/kg vyjadřuje vlastně kapacitu zásobníku energie. Výkonová hustota W/kg slouží pro posouzení dynamických vlastností vozidla. Obě závisí na druhu pohonu a systému zásobníku. Mezi další parametry patří velikost okamžitého odebíraného a dodávaného výkonu. Závisí na tom životnost motoru a akumulátoru. Pro porovnání systémů jsou důležité také hospodárnost, nízká spotřeba paliva, vysoká životnost a nízké emise výfuku i hluku.

## 5 Akumulátory

### 5.1 Požadavky na trakční baterie

Trakční baterie jsou, co se týká proniknutí na trh elektrických bateriových vozidel, nejdůležitějším komponentem elektropohonu. Jejich výkonová hustota, tj. odnímatelný elektrický výkon na jednotku hmotnosti, určuje konečnou rychlost a zrychlení vozidla. Jejich energetická hustota, tedy obsah energie na jednotku hmotnosti, určuje jejich dojezd. Na trakční baterie vozidel jsou kladeny následující požadavky:

- možnost rychlého nabíjení akumulátoru, bezúdržbovost, životnost 5 až 10 let
- umožňovat jízdní výkon více než 50 000 km
- dosahovat energetické hustoty alespoň 200 Wh/kg, hustotu výkonu asi 100 W/kg
- cena baterie by neměla přesahovat 150 Euro/kWh.

V současné době jsou používané olovo-gelové baterie a plynotěsná baterie nikl-kadmium. Obě jsou očekávaným hodnotám hustoty výkonu již blízko. Ovšem ještě nedosahují požadované zásobní kapacity. Životnost baterie olovo-gel je mimoto velmi omezena. Největší problém všech typů baterií je jejich vysoká hmotnost a zástavbový prostor ve srovnání s klasickou palivovou nádrží. Porovnání hmotnosti a objemu energetických zásobníků jednotlivých typů alternativních pohonů s 67 litrovou nádrží benzínu je provedeno v tabulce.

<i>Zdroj energie</i>	<i>Benzín</i>	<i>Nafta</i>	<i>Ethanol</i>	<i>Methanol</i>	<i>Vodík tekutý</i>	<i>Vodík Ti-Fe</i>	<i>Olověná baterie</i>	<i>Baterie Na-S</i>
<i>Účinnost (%)</i>	20	30	23	23	20	22	70	70
<i>Objem (l)</i>	67	46	86	97	250	264	2 040	1 430
<i>Hmotnost (kg)</i>	47	32	67	75	124	1 048	5 300	1 430

Tabulka: Hmotnostní a prostorové porovnání nádrží různých druhů energie

V další tabulce je pak přehled důležitých údajů jednotlivých typů baterií.

<i>typ baterie</i>	<i>hustota energie</i>		<i>výkonová hustota</i>		<i>životnost</i>		<i>cena</i>
	<i>Wh/kg</i>	<i>Wh/l</i>	<i>Wh/kg</i>	<i>Wh/l</i>	<i>cyklů</i>	<i>let</i>	<i>€/kW</i>
<i>olovo</i>	30-50	70-120	150-400	350-1 000	50-1 000	3-5	100-150
<i>nikl-kadmium</i>	40-60	80-130	80-175	180-350	>2 000	3-10	225-350
<i>nikl-metalhydrid</i>	60-80	150-200	200-300	400-500	500-1 000	5-10	225-300
<i>sodík-niklchlorid</i>	85-100	150-175	155	255	800-1 000	5-10	225-300
<i>lithium-iontová</i>	90-120	160-200	300	300	1 000	5-10	275
<i>lithium-polymer</i>	150	220	300	450	> 1000	-	< 225
<i>zinek-vzduch</i>	100-220	120-250	100	120	-	-	60
<i>cílové hodnoty</i>	80-200	135-300	75-200	250-600	600-1 000	5-10	90-135

**Tabulka: Přehled údajů jednotlivých baterií**

## 5.2 Princip baterií

Galvanické baterie, akumulátory a dále popsané palivové články mění chemickou energii přímo na elektrickou. Baterie a akumulátory pracují podle základního principu, že dvě elektrody z různých materiálů jsou ponořené do kapaliny nebo pevné látky (elektrolytu), obsahující pohyblivé elektricky nabitě částice. To umožňuje uvnitř článku vodivé spojení mezi oběma elektrodami. Elektrolyt je obvykle zředěná kyselina nebo zásada či rozpuštěná sůl.

Elektrody mají příslušný rozdílný potenciál oproti elektrolytu odpovídající jejich rozličné pozici v elektrochemické napěťové řadě. To mezi nimi způsobuje napětí. Jsou-li spojeny vnějším vodičem, protéká jimi proud. Uvnitř galvanického článku je proudový okruh uzavřen pohybem iontů, které protékají elektrolytem z jedné elektrody na druhou. U baterie měď-zinek proudí ionty z elektrody s malým potenciálem, tedy zinku. Na měděnou elektrodu jsou ionty mědi z roztoku (např. roztok měď-chlorid) pomocí volných elektronů redukovány na měď. Proud protéká tak dlouho, dokud se všechny ionty mědi z roztoku nespoteřebují, tj. dokud se celková chemická energie nezmění na energii elektrickou.

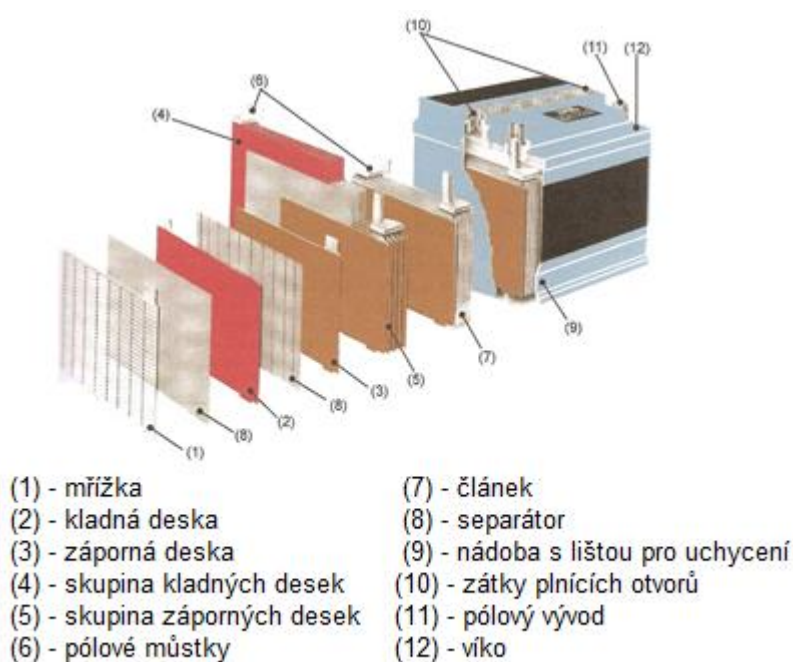
První elektrický článek vyvinul A. Volta (1745-1827) v roce 1800. Tím byla také stanovena první napěťová řada. Napětí mezi elektrodami galvanického článku nezávisí na velikosti nebo tvaru elektrod, ale jen na jejich materiálu. Typické hodnoty se nacházejí mezi 1 a 4 V. Chce-li se dosáhnout vyššího napětí, pak se musí spojit více galvanických článků do řady. Na rozdíl od baterií (primární články) jsou chemické průběhy v akumulátorech (sekundární články)



principiálně obrácené. Akumulátory mohou být opět nabíjeny. Počet cyklů nabití a vybití je většinou omezen, neboť obrácené chemické procesy neprobíhají dokonale. Také je pro akumulátory částečně používáno označení „baterie“, neboť tento pojem byl v odborné literatuře (v tématice vozidlové techniky) také pro sekundární články zaveden. Nejznámějším příkladem je startovací olověný akumulátor ve vozidle.

### 5.3 Olověný akumulátor

Katoda (záporná elektroda) se skládá u olověného akumulátoru v nabitém stavu z čistého olova, anoda (kladná elektroda) z oxidu olovičitého. Mezi oběma elektrodami je napětí cca 2 V. Elektrolyt je zředěná kyselina sírová.



**Obr. 5.01: Konstrukce klasického olověného akumulátoru**

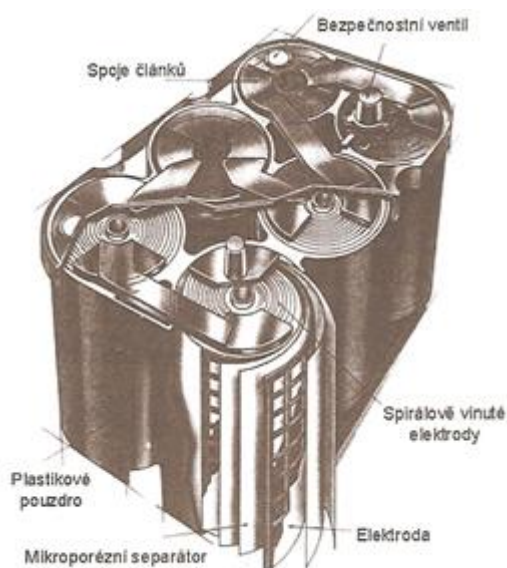
Je-li akumulátor vybíjen, difundují ionty olova do elektrolytu, kde reagují na sulfát olova. Přitom uvolňované elektrony protékají vnějším proudovým obvodem k anodě. Při vybíjení se reakce obrací. Ze sulfátu olova a vody se opět tvoří olovo, oxid olovičitý a kyselina sírová. Vybíjecí a nabíjecí proces je schematicky znázorněn následující rovnicí.



Cenová výhoda výroby a dlouhodobé praktické zkušenosti předpokládají, že je ještě dnes olověný akumulátor používán ve většině zásobníků energie pro elektrovozidla. Nevýhodou je, že je velmi těžký a může akumulovat jen velmi málo energie, cca 25 Wh/kg. Olověné baterie pro elektrovozidla mohou dnes již být přibližně 80krát nabity a vybity. Olověné baterie

použité pro startování mají parametry životnosti a počet cyklů dvakrát větší než pro účely elektropohonu. Je to dáno vyšším namáháním v případě pohonu vozidla. Zkrácením doby nabití např. na 2 hodiny se sníží kapacita asi o 20 %. V baterii olovo-gel je elektrolyt obsahující kyselinu sírovou jako gel. Proto klesá poněkud energetická hustota, avšak baterie je tímto způsobem plynotěsná, a tím bezúdržbová.

Jedním z posledních typů olověného akumulátoru je založen na principu technologie spirálových článků.



**Obr. 5.02: Olověný akumulátor se spirálovými články**

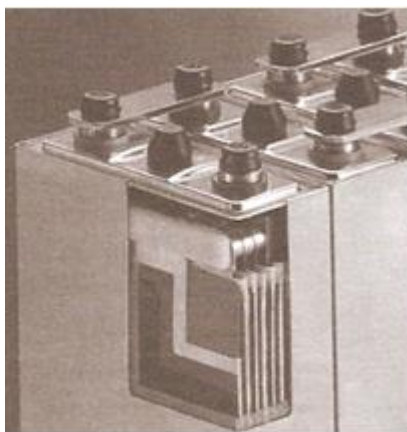
Oproti klasickým akumulátorům má 3krát větší životnost. Nosné části jsou z čistého olova, elektrolyt je obsažen v mikroporézní skelné vatě separátorů. Vodík a kyslík vyvíjející se při nabíjení jsou rekombinovány na vodu, akumulátor je bezúdržbový. Rychlá rekombinace je umožněna vrstvou mezi zápornou elektrodou. Tímto uspořádáním je v článku vytvořeno a udržováno vakuum během cyklování a zvláště při rychlém nabíjení vysokými proudy. Nabíjecí proud může dosáhnout až 100 A při napětí 14,4 V. Takto lze plně nabití zkrátit až na jednu hodinu. Dosavadní zkoušky prokázaly životnost olověných akumulátorů používaných pro pohon vozidel asi čtyři roky nebo 300 cyklů nabíjení, vybíjení a dojezd 25 000 km. Reálný dojezd vozidel s olověnými akumulátory na jedno nabití je asi 50 km. Trakční akumulátorové baterie vykazují nižší rozsah provozních teplot od -15 až do +45 °C, což vede k výraznému poklesu dojezdu elektrického vozidla při nižších teplotách.

#### 5.4 Baterie Nikl-kadmium

Baterie nikl-kadmium mají pro elektrovozidla velký význam. Jsou ve spotřebitelském oboru vyráběny jako malé, plynotěsné, uzavřené knoflíkové články. Jako velké baterie jsou dosud používány ve tvaru otevřených článků. Mají-li být pro elektrovozidlo vyrobeny jako

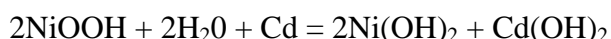
bezúdržbové, musí být vyvinuty v plynotěsné verzi, jejich kapacita může být zvýšena speciální stavbou elektrod.

Elektrody jsou složeny z vláken, které obsahují elektricky vodivé niklem vrstvené materiály. Obě aktivní hmoty nikloxid a kadmium dovolují silné vybití baterie. Elektrolytem je vodní roztok hydroxidu draselného, který se, ostatně jako zředěná kyselina sírová olověné baterie, nepodílí na reakci, ale jen na transportu iontů mezi elektrodami. Baterie může být velmi rychle nabíjena.



**Obr. 5.03: Akumulátor Ni-Cd**

Vozidlo vybavené tímto typem baterií dosahuje většího dojezdu, až o 50 % než s olověnými bateriemi stejné hmotnosti. Za jistých podmínek vzniká paměťový efekt. K dosažení plné kapacity musí být baterie pravidelně úplně (cyklicky) vybita. Také jedovatý těžký kov kadmium vede k výhradám proti zavádění tohoto zásobníku energie. Reakce při nabíjení a vybití nikel-kadmiového-akumulátoru je následující:



Baterie nikel-kadmiové, přestože mají vyšší pořizovací náklady než olověné, dosahují životnosti 1500 cyklů při dojezdu 120 000 km.

Nový typ těchto akumulátorů (např. HOPPECKE FNC) používá technologie, kde jsou kladné i záporné elektrody vytvořeny deskami umělohmotného vlákna a ve speciálních lázních poniklovány. Tím je vytvořena lehká kompaktní elektroda, ve které je do kladné desky pastován hydroxid nikelný a do záporné desky hydroxid kademnatý. Izolace desek je provedena plastovými separátory. Napětí článků je 1,2 V.

Tyto akumulátory vynikají zejména vysokou proudovou zatížitelností, vysokým počtem cyklů až 3000, vysokou životností 20 až 25 let, nízkou hmotností a širokým rozsahem teplot od -50 do +50 °C. Např. typ akumulátoru „T“ se používá k pohonu akumulátorových trakčních vozidel, typ „X“ splňuje požadavek nabíjení velmi vysokým proudem po dobu kratší 10 min.

Další akumulátor vhodný k pohonu vozidel je firmy SAF T, konkrétně typ STM o kapacitě 100 Ah s vodním chlazením a systémem automatického doplňování destilované vody, integrovaném přímo ve víku baterie. Při skladování v prázdném a vybitém stavu za doporučených podmínek je lze skladovat mnoho let.

#### Výhody Ni-Cd akumulátorů:

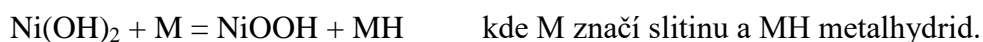
- menší samovybití
- odolné i při nízkých teplotách
- odolné proti otřesům a zkratům
- odolné proti přebíjení a úplnému vybití
- vyšší životnost než olověné akumulátory

#### Nevýhody Ni-Cd akumulátorů:

- vysoká cena
- nižší napětí na článek
- větší vnitřní úbytek napětí
- horší kontrola stavu nabití
- nutnost recyklace (přítomnost kadmia)

### 5.5 Baterie Nikl-metalhydridová

Podobná baterii nikl-kadmiové je baterie nikl-metalhydridová, která je převážně používána v moderních elektrovozidlech. Její anoda je na bázi sloučenin niklu, záporná elektroda ze slitiny pohlcující vodík. Elektrolytem je zředěný roztok hydroxidu. Mezitím je separátor naplněný bazickým elektrolytem, většinou ředěným roztokem vápenného, nebo lithiového hydroxidu. Při vybíjení je hydroxid nikloxydu (NiOOH) redukován na anodě s vodou na niklhydroxid, přičemž odebírá z molekuly jeden elektron. Tvoří se skupina OH, která putuje ke katodě, kde předá hydrid jeden elektron a jeden atom vodíku. Elektron protéká vnějším proudovým obvodem, atom vodíku tvoří se skupinou OH vodu. Při nabíjení probíhá tato reakce v obráceném směru, viz následující znázornění:



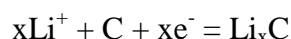
Svorkové napětí naprázdno je 1,3 až 1,4 V, měrná energie 55-80 Wh/kg. Baterie niklmetalhydrid jsou neškodné okolnímu prostředí. Mimoto mají ve srovnání s bateriemi nikl-kadmiovými vyšší výkon i energetickou hustotu. Ale nemohou být tak často nabíjeny a vybíjeny. Také u nich se vyskytuje paměťový efekt. Problémy jsou dále jen s ještě vysokou cenou a relativně nákladnou recyklací na konci životnosti.

## 5.6 Baterie lithium-iontová

Katoda lithium-iontové baterie je složena z  $\text{Li}_2\text{MnO}_2$  nebo  $\text{LiCoO}_2$  a nebo  $\text{LiNiO}_2$ . Anoda je z uhlíkové matrice připravené z grafitisovaných částí koksu. Elektrolyt je z vodivé soli (např.  $\text{LiPF}_6$ ) a rozpouštědla. V případě Li-iontového systému s katodou z  $\text{LiCoO}_2$  a uhlíkovou anodou probíhají elektrodové reakce, definované pro katodu rovnicí



a pro anodu rovnicí



Mezi elektrodami vzniká rozdíl potenciálu 3,6 až 3,7 V. Při nabíjení se ukládají ionty lithia do mřížky uhlíku katody. Při vybíjení jsou opět uvolňovány. Neboť ionty mezi anodou a katodou kmitají (oscilují), proto se tento akumulátor v hovorovém jazyce nazývá kmitavá baterie. Typický tvar článku je válcový. Lithium-iontové baterie mají vysokou energetickou a výkonovou hustotu a stejnou cyklovou pevnost jako baterie nikl-metalhydridové. Měrná energie dosahuje 120 až 130 Wh/kg a životnost až 1000 cyklů. Paměťový efekt se u nich nevyskytuje. Jejich kapacita relativně silně závisí na teplotě, klesá rychle mimo optimální rozsah mezi 5 a 30 °C. Dalším problémem je dosud ještě vysoká cena.

## 5.7 Baterie lithium-železo-fosfátové (LiFePO)

Tyto nové typy baterií vynikají rychlým nabíjením, vysokým počtem nabíjecích cyklů, minimálním samovybíjením a vyšší proudovou zatížitelností. Nabíjecí napětí článků je 3,6 V, jmenovité 3,2 V. Jejich energetická hustota je 90–120 Wh/kg. Baterie můžeme poskládat a docílit vyššího požadovaného nominálního napětí. Články mohou krátkodobě poskytovat pracovní proud až dvacetinásobek kapacity článku. U tohoto typu baterií prakticky neexistuje samovybíjení a lze je dobíjet kdykoli, aniž byste museli čekat na úplné vybití.



Obr. 5.04: Baterie LiFePO

Tyto akumulátory se s výhodou používají jako přímá náhrada olověných akumulátorů, protože čtyřčlávková sada má při provozu velice podobné napětí jako 12V olověný akumulátor.

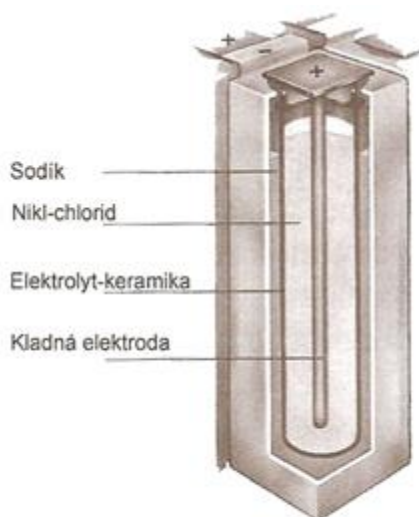
## 5.8 Baterie lithium-titan-oxid (LTO)

Materiál baterie LTO má velkou měrnou plochu vzhledem k hmotnosti, takže je možné rychlé nabíjení a vybíjení. Další výhodou je možný provoz za nízkých teplot a velmi dlouhá cyklická životnost (tisíce cyklů). Jmenovité napětí jednoho článku je nižší než u předchozího typu a to 2,4 V. Energetická hustota je také nižší. Její cena je vyšší.

## 5.9 Baterie vysokoteplotní

Vysokoteplotní baterie, také zvané vysokoenergetické baterie, potřebují pracovní teplotu mezi 250 a 330 °C. Ve stadiu prototypové vypslosti se dosud nacházejí baterie sodík-síra a sodík-niklchlorid. Sodík-niklchlorid je nazývána jako ZEBRA-baterie (Zero-Emission Battery).

U obou typů baterií katoda není pevná deska, ale tekutý sodík. Anoda pozůstává právě platná názvu baterie z pevného niklchloridu nebo síry. Je potopena do viskózní tekutiny, např. niklchloridových částic smíšených s roztavenou solí. Obě elektrody jsou odděleny izolační keramikou z oxidu hliníku, kterou protékají ionty sodíku při teplotě kolem 300 °C.



**Obr. 5.05: Baterie sodík-niklchlorid**

Během vybíjení sodík-niklchloridové baterie vzniká v roztavené soli kuchyňská sůl a nikl, při nabíjení se vytváří opět zpětně výchozí látky. Síra je při vysoké teplotě silně korozivní. To musí být při konstrukci baterie zohledněno propustným ocelovým válcem, který brání rychlé vzájemné reakci síry a sodíku. U anody z pevného nikl-chloridu nedochází k žádné korozi.

### Výhody vysokoteplotních baterií jsou:

- třikrát větší zásoba energie ve srovnání s olověným akumulátorem
- bezúdržbovost
- odpadní teplo je využito k jejímu ohřevu
- nevykazují žádné chemické samovybíjení



### Nevýhody jsou:

- pracovní teplota musí být stále udržována
- životnost je relativně malá

## 5.10 Vysokoenergetické kondenzátory - superkondenzátory

Jedná se o kondenzátory s vysokou životností pro opakované použití, které dodávají dávku elektrické energie vybíjením a nabíjením, potřebnou pro krytí výkonových špiček při akceleraci a velkém zatížení vozidla, převážně u hybridních vozidel.

Tyto kondenzátory uchovávají energii přímo ve formě elektrické energie, čímž je tento akumulární prvek principiálně nejvýhodnější, není nutná transformace do jiné formy energie, čímž dochází ke ztrátám. Vyrábí se různými technologiemi. Existují kondenzátory na bázi keramiky, klasické svitkové nebo metalické, nebo elektrolytické a tantalové.

Vysoko energetické kondenzátory dosahují kapacit až  $10^4$  F. Jsou založeny na využití vlastností elektrické dvojvrstvy. Mezi elektrodami z porézního uhlíku je tekutý nebo gelový elektrolyt. Porézní uhlík zaručuje extrémně velký měrný povrch až  $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ . Rovněž zaručuje velmi nízký odpor přírodních elektrod. Tím je zajištěna vysoká rychlost nabíjecího a vybíjecího procesu. Další výhodou je nízká ztráta zásobené energie během cyklu a nízké průrazné napětí elektrické dvojvrstvy.



Obr. 5.06: Konstrukce superkondenzátoru

Pro získání potřebných parametrů se kondenzátory řadí sériově, paralelně, nebo sérioparalelně. Získáme tak kondenzátor s vysokou kapacitou, s vysokou výkonovou a energetickou hustotou. Příkladem může být modul firmy Siemens, s kapacitou 100 F, výkonovou hustotou  $80 \text{ W/kg}$ , který je schopen dodávat výkon až  $12,5 \text{ kW}$  po dobu pěti sekund. To se využívá při špičkovém zatížení např. při silném zrychlení, rozjezdu nebo předjíždění.

## 5.11 Nabíjení akumulátorů

Pro nabíjení akumulátorů elektrovozidel můžeme využít nabíjecí stanice veřejné nebo soukromé. Ty pak mohou být klasické nebo rychlonabíjecí. Nabíjení elektrických vozidel popisuje norma IEC 61851-1:2001 (odpovídá ČSN EN 61851-1).

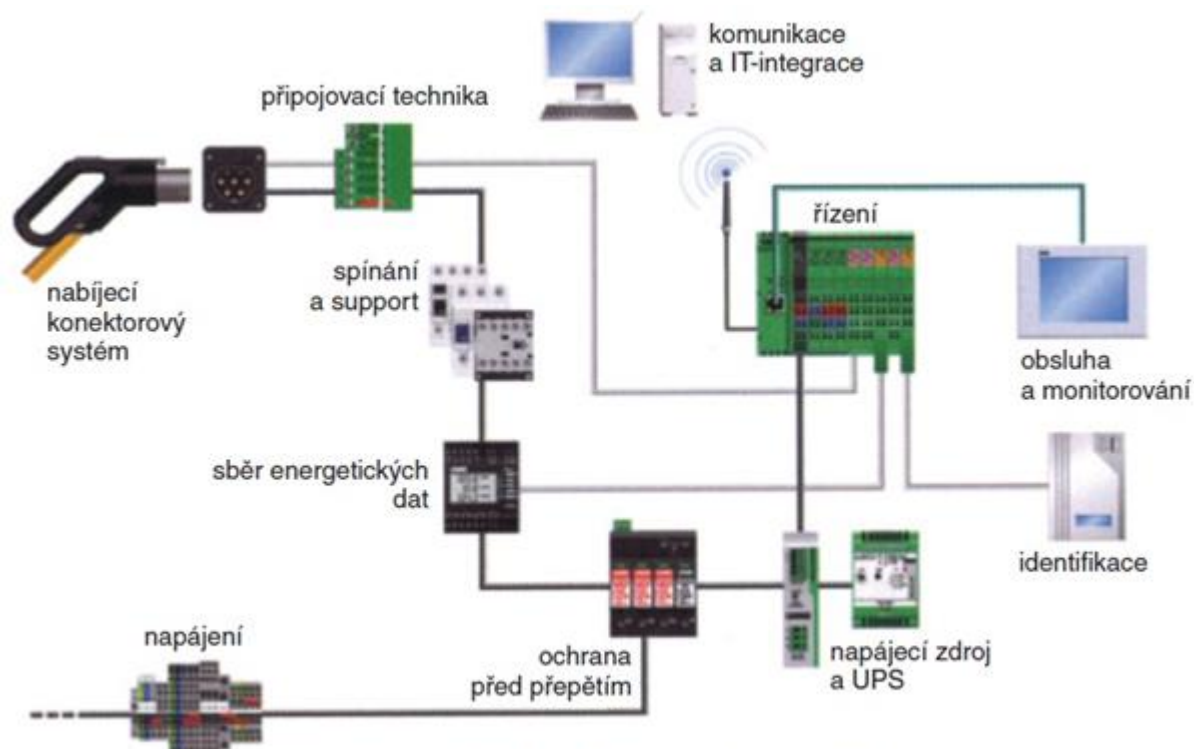
### Režimy nabíjení

Pro nabíjení ze střídavé elektrické sítě jsou definovány 3 režimy nabíjení.

Nabíjecí režim 1 – vozidlo je spojeno přímo s rozvodnou sítí, zpravidla přes běžnou síťovou zásuvku. Z bezpečnostního hlediska je toto poněkud sporné a také řízení nabíjecího procesu je nedokonalé.

Nabíjecí režim 2 – mezi elektrickým vozidlem a domácí zásuvkou je zapojena řídicí skříň (tzv. in-cable-control-box), která přebírá bezpečnostní funkce, jako např. sledování ochranného vodiče, a je zde již na straně vozidla požadován nabíjecí konektor podle IEC 62196 (odpovídá ČSN EN 62196-1).

Nabíjecí režim 3 – jsou zde do nabíjecího stojanu napevno integrovány bezpečnostní funkce a přednastavení nabíjecího proudu přes řídicí zařízení (tzv. control-pilot device), čímž je umožněn zátěžový a energetický management. Pro tento nabíjecí režim, který by měl být v soukromé oblasti upřednostňován, jsou stanoveny jak na straně vozidla, tak na straně nabíjecí infrastruktury konektorová zařízení podle IEC 62196.



Obr. 5.07: Topologie nabíjení v režimu 3



## Typy konektorů

Principiálně jsou zde možné různé typy konektorů – typ 1, 2 nebo 3.

Konektor typu 1 je určený pro jednofázové nabíjení proudem do 70 A a upřednostňují ho výrobci z Asie a USA.

Konektor typu 2 odpovídá IEC 62196-2 a je určený jak pro jednofázové nabíjení proudem 16 až 32 A (režim 2), tak pro třífázové nabíjení proudem do 63 A (režim 3). Typ 2 je upřednostňován německými výrobci automobilů. Tento robustní a pro používání jednoduchý konektorový systém umožňuje přenášet velké výkony, a to u jednofázové verze až 3,7 kW, u třífázové verze dokonce až 43 kW.



Obr. 5.08: Nabíjecí konektor typu 1



Obr. 5.09: Nabíjecí konektor typu 2

Konektor typu 3 je určený pro nabíjení proudem 16 až 32 A a používají ho v současné době italské výrobci automobilů.

## Nabíjecí stanice

Nabíjecí stanice v soukromém parkovacím přístřešku nebo v garáži může mít o některé funkce méně. Identifikace zde většinou není třeba, měření elektrické energie slouží především jen pro informaci a musí být ve shodě s cejchovním právem jen podle zvláštních smluv o trakčním proudu. Často je tento systém řešen jako nástěnný – buď se zásuvkou a volným propojovacím nabíjecím kabelem, nebo kabelem, který je na jedné straně pevně připojen k nabíjecí stanici a na druhé straně má konektor pro připojení k vozidlu. Nabíjecí stanice by měla spolehlivě pracovat i při nepříznivých povětrnostních poměrech, jako např. za mrazu nebo přímého slunečního záření. Přes komunikační rozhraní je nabíjecí stanice spojena s informační technikou uvnitř objektu. Vítané jsou také dálková zobrazení dobitého množství elektrické energie na inteligentním telefonu nebo dálkový přístup prostřednictvím dodavatele elektrické energie, který posílá tarifní signály na nabíjecí stanici.

V polosoukromé firemní síti je třeba posuzovat topologii nabíjecí infrastruktury poněkud diferenciovaněji. Zde mohou existovat požadavky na identifikaci a záznam údajů o odběru trakčního proudu v souladu s cejchovním právem. Tento systém může mít kompaktní řízení

uloženo např. v centrálním skříňovém rozváděči, ze kterého může být ovládáno více satelitních stanic, které vyžadují již jen menší řídicí inteligenci.

### Možnosti nabíjení akumulátorů

Možnosti nabíjení akumulátorů jsou tzv. AC Slow Charging, tedy pomalé střídavé dobíjení. Tento princip je primárně určen k domácímu nabíjení. Pro tento způsob nabíjení je využívána vždy nabíjecí jednotka zabudovaná ve vozidle, jejíž výkon je ve většině případů limitován proudem 16 A s ohledem na jištění zásuvek v běžných domácnostech či garážích. V tomto případě je nabíjecí doba dána rozmezím 5 až 8 h.

V případě, že výrobce vybaví elektromobil silnější nabíjecí jednotkou např. 32/64 A, pak jde o tzv. AC Fast Charging, tedy o rychlé střídavé dobíjení a příslušná doba nabíjení se adekvátně zkracuje. V tomto případě ovšem běžná domácí zásuvka nestačí a je třeba využít dostatečně dimenzovanou přípojku elektrické energie, tzv. AC pole.

U sériově vyráběných elektromobilů se výrobci zatím drží zmiňovaných 16 A, aby umožnili právě dobíjení z běžné zásuvky a pro rychlé dobíjení nabízejí alternativu nabíjení elektromobilů tzv. DC Fast Charging, tedy rychlé stejnosměrné dobíjení. Úlohu nabíjecí jednotky zabudované ve vozidle v tomto případě přebírá externí, zpravidla velmi silná nabíjecí stanice o výkonech 50 až 250 kW. U tohoto způsobu nabíjení se pohybuje nabíjecí doba obvykle v rozmezí 15 až 30 min.

Při dobíjení stanicí ABB Hermes 1.0 o výkonu 50 kW lze počítat s dobou nabíjení v případě malého elektromobilu asi 15 min. Tato hodnota odpovídá nabíjení z 25 na 80 % kapacity baterie, což je v praxi nejběžnější situace. Co se týče nabíjení z 80 na 100 % kapacity, je třeba k tomu dalších asi 50 min. Vychází to z fyzikálního principu nabíjení baterií. Nejrychleji se baterie nabíjejí v počáteční fázi a nejpomaleji v závěrečné fázi, tj. v rozmezí 80 až 100 % kapacity.

## 6 Řízení pohonů

### 6.1 Stejnoseměrné cize buzené motory

Výhodou je jednoduchá a plynulá regulace otáček v širokém rozsahu a kontinuální přechod z jízdy na brzdění. Ze základních rovnic, které popisují stejnosměrný motor, vyplývá, že pro řízení otáček a brzdění můžeme použít tyto způsoby:

- Řízení napětím
- Řízení tokem
- Řízení odporem
- Brzdění protiproudem
- Brzdění odporové

#### Řízení napětím

Při řízení napětím se nezvyšují ztráty, nedochází k omezení maximálního momentu a snadno se provádí reverzace. Je to nejpoužívanější způsob.

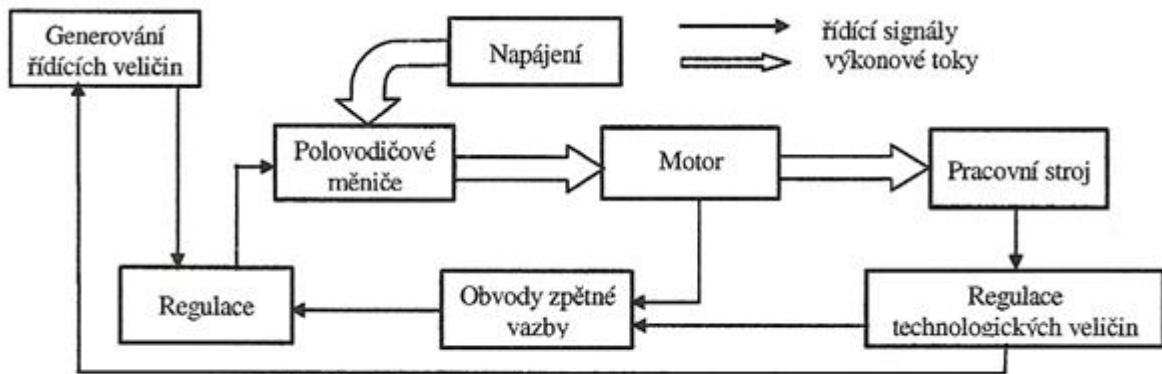
#### Řízení tokem

Řízení tokem se používalo jako doplňkové, jelikož zde docházelo k omezení maximálního momentu a maximálních otáček. Navíc se muselo hlídat buzení kvůli odbuzení stejnosměrného motoru.

#### Řízení odporem

Řízení odporem je velice ztrátové a používalo se spíše ke spouštění stejnosměrných strojů.

K regulaci všech typů stejnosměrných elektromotorů je použito elektronické regulace napájení vinutí motoru pomocí křemíkových tyristorů měniče s pravoúhlým průběhem napětí. Zvolená střední hodnota proudu se nastavuje změnou frekvence a amplitudy. Pro brzdění v rozsahu regulace pole postačuje zvýšení buzení pole. Napětí motoru proto stoupá nad napětí baterie, a tím způsobem je přes diody, nebo tyristory měniče dodávána energie zpět do baterie.

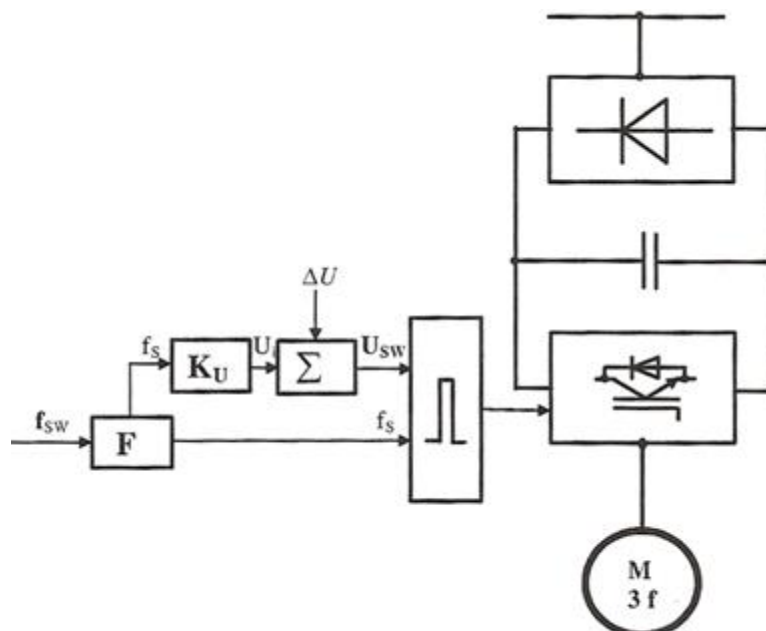


Obr. 6.01: Blokové schéma řízení stejnosměrného motoru

## 6.2 Asynchronní motory

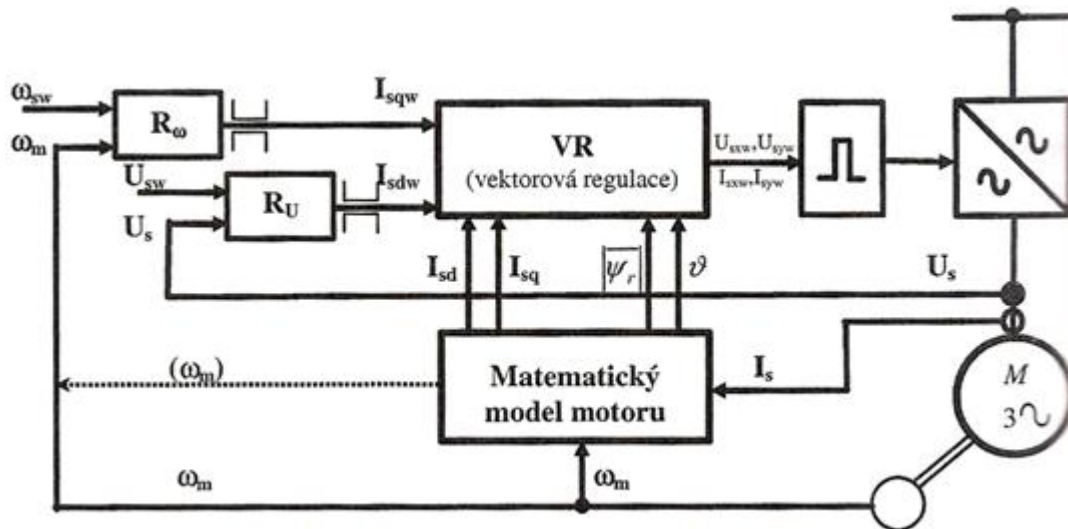
Použití asynchronních motorů se začalo realizovat díky rozvoji polovodičové techniky a vývojem měničové techniky a regulační techniky. K regulaci tahové síly a otáček motoru musí být proměnná frekvence i napětí. Splnění těchto regulačních požadavků vyžaduje vysoké náklady na výkonový obvod. Zpětné získání energie při brzdění je možno realizovat s vysokou účinností.

Pro regulaci asynchronních motorů je potřeba střídačů, které umožňují skalární, nebo vektorové řízení otáček. U skalárního řízení se používají měniče kmitočtu s napětovým střídačem pro napětově-kmitočtové řízení. Zde se snažíme udržet určitý poměr napětí k frekvenci.



Obr. 6.02: Blokové schéma obvodu pro napětově-frekvenční řízení AM

Vektorové řízení se využívá při řízení dynamicky náročných pohonů s asynchronními motory. Jedná se o oddělené řízení točivého momentu a proudu. Základem regulačního obvodu je regulátor otáček pro regulaci momentu a regulátor napětí pro regulaci proudu. Dále obvod obsahuje matematický model motoru a blok vektorové regulace pro výpočet vektoru požadovaného napětí.



Obr. 6.03: Blokové schéma vektorového řízení AM

## 7 Diagnostika závad

Diagnostika závad pohonů elektromobilů je v současné době prováděna výhradně v odborných servisech, kde se diagnostika provádí přes PC pomocí speciálních programů. Pomocí těchto programů je diagnostikována závada, a pokud je možno tuto závadu odstranit (například dotažením a podobně), tak se závada odstraní. Odstranění větší závady se provádí výměnou celého dílu za nový. Servis rozhodne, zda se díl opraví ve specializované opravně nebo zda se ekologicky zlikviduje.

V této kapitole se budeme zabývat základními měřeními, kterými si můžeme zjistit stav pohonu, a popíšeme některé parametry a možnosti jejich měření důležité pro zjištění stavu motoru při údržbě.

### 7.1 Měření izolačního odporu

Za základní parametr motoru, který je nutné kontrolovat při údržbě kromě kontroly pracovního proudu odebíraného motorem, lze považovat izolační stav vinutí motoru. Je to parametr, který dlouhodobě ovlivňuje provozní schopnosti všech typů motorů.

Velká většina poruch motorů je způsobena právě:

- zhoršením, nebo dokonce poškozením izolace vinutí motoru proti kostře motoru,
- poškozením izolace mezi jednotlivými cívkami vinutí motoru nebo
- poškozením izolace mezi závity vinutí jednotlivých cívek.

#### Základní měření izolačního stavu vinutí



Obr. 7.01: Měřič izolačního stavu Kyoritsu 3125A

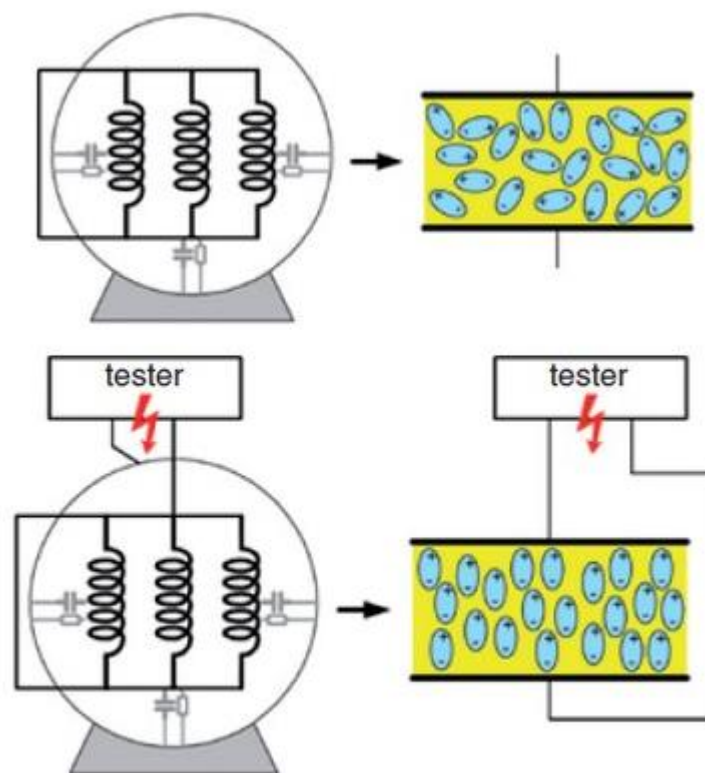
Základní měření izolačního stavu vinutí, které lze snadno provést, je zjištění izolačního stavu přiložením stejnosměrného napětí vhodné velikosti na jednotlivé cívky motoru a výpočtem



odporu z poměru tohoto napětí a protékajícího proudu. To lze provést běžným měřičem izolačního stavu, např. přístrojem Kyoritsu 3125A (obr. 7.01) s možností volby velikosti napětí od 250 V do 5 kV a rozsahem měřitelného izolačního odporu až 1 TΩ.

Vzhledem k tomu, že izolační stav vinutí se mění s časem, jak stárne materiál izolace, ale i s teplotou, která má navíc vliv na rychlost stárnutí, není pouhá kontrola izolačního odporu motorů dostatečným a průkazným indikátorem jeho stavu z pohledu možné poruchy. (Jestliže ovšem sledujeme hledisko dlouhodobého stavu výrobního zařízení, a neřešíme jen následky havárie zanedbaného systému.) Zde je dobré upozornit, že dlouhodobé překračování provozní teploty vinutí motoru o pouhých 10 °C, zkracuje životnost jeho izolace o 50 %!

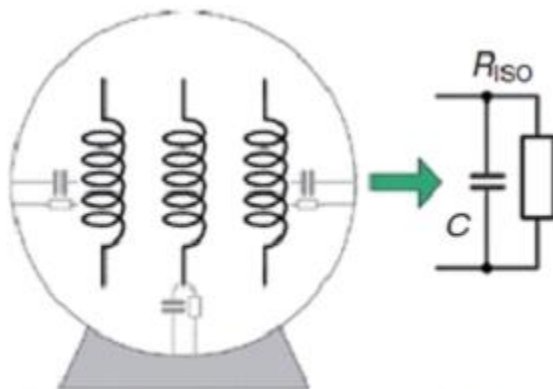
Snížení izolační schopnosti vinutí se zjednodušeně projevuje i postupnou ztrátou „elektrické elasticity“ materiálu izolace. V horní části obr. 7.02 lze vidět náhodné uspořádání molekul izolačního materiálu a v jeho spodní části jejich uspořádání při přiložení stejnosměrného napětí na cívku motoru. K tomuto uspořádání však nedojde okamžitě po přivedení napětí, ale po určité době, neboť jednotlivé molekuly se projevují jako jakési samostatné kondenzátory, které se nabíjejí.



**Obr. 7.02: Uspořádání molekul izolačního materiálu**

Izolaci si lze tedy při zjednodušení představit jako paralelní zapojení odporu  $R_{ISO}$  a kondenzátoru  $C$  (obr. 7.03). Čas nabití tohoto kondenzátoru je závislý, krom jiného, i na „elektrickém“ stáří materiálu izolace, tedy na tom, že postupně více a více molekul se

nenastaví ve směru působení elektrického pole izolantu. Lokálně v izolantu vzniká větší elektrické pole, které vede k mikroprůrazům, a tím ke zhoršení izolačního stavu.



Obr. 7.03: Popis izolace jako soustavy kondenzátorů

Při přiložení střídavého napětí, které mění svou polaritu  $100\times$  za sekundu dochází k otáčení molekul v rytmu změny polarity napětí. Zpomalené molekuly, které se nestíhají díky stáří izolace otáčet, dále zhoršují izolační vlastnosti materiálu a hrozí průrazem izolace.

Z předchozího popisu je tedy jasné, že proud při měření izolace není stálý, ale mění se v čase. Zpočátku je velký a postupně klesá až do jeho ustálení na nejmenší hodnotě, která odpovídá velikosti izolační schopnosti. Čím je tedy tento proud na počátku měření větší a v ustálení menší, nebo naopak, čím je izolační odpor na počátku měření menší a na konci větší, tím je elasticita materiálu lepší, a tedy elektrické stáří izolace lepší. Tento poměr lze tedy snadno využít k zjištění, v jakém stavu je izolace dlouhodobě.

### Polarizační index

Parametr, který využívá tento poměr, se nazývá polarizační index (PI) (obr. 7.04). V praxi se např. používá poměr odporu naměřeného po jedné minutě po připojení napětí a po deseti minutách. Tedy  $PI = R_{ISO10}/R_{ISO1}$ . Čím je tento poměr větší, je stáří izolace lepší. V praxi  $PI > 4$  je dobrá, mladá izolace,  $PI < 1,5$  je již velmi stará izolace, která hrozí průrazem. Tuto funkci lze nalézt např. u již zmíněného přístroje KEW3125A. V praxi se velmi vyplatí sledovat, zaznamenávat a vyhodnocovat PI v čase. U velkých nákladných motorů např. po půl roce vynášet naměřené hodnoty do grafu.

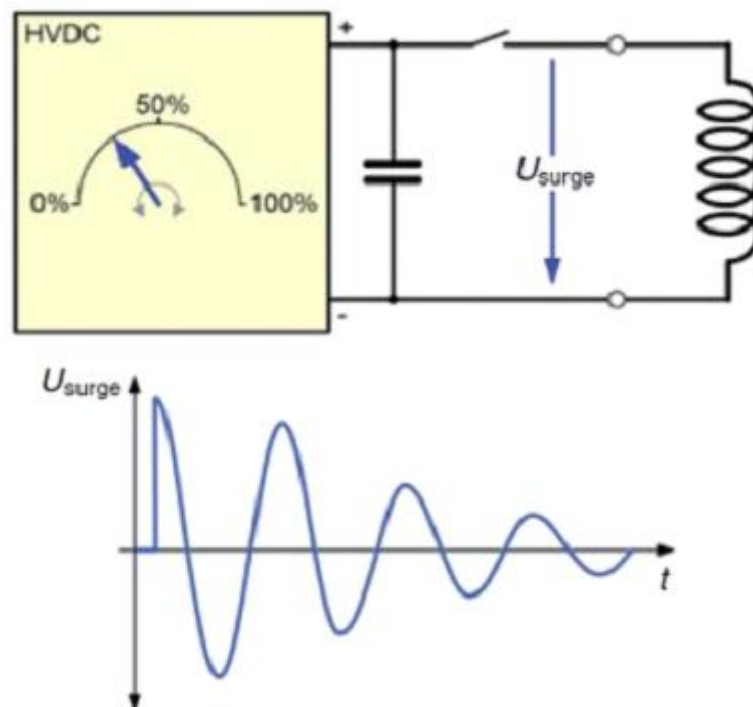


Obr. 7.04: Vyjádření polarizačního indexu

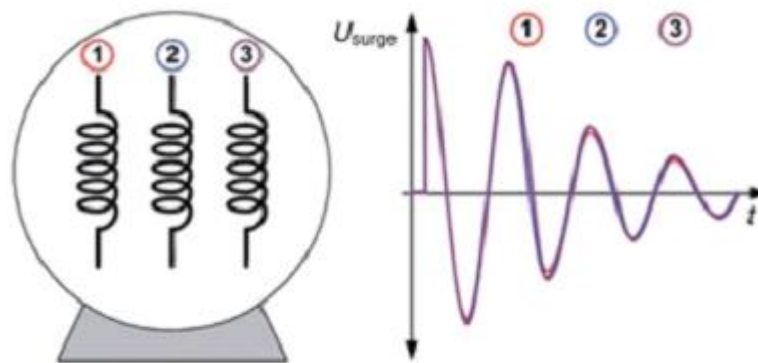
Měření izolačního odporu cívek a jejich PI lze využít při údržbě pro získání představy o stavu a stáří izolace celého vinutí motoru, nedává však, příliš mnoho informací o možných mezizávitových průrazech nebo o průrazech napěťově závislých, které jsou časté, např. při navlhnutí izolace motoru.

### Test rázovou vlnou

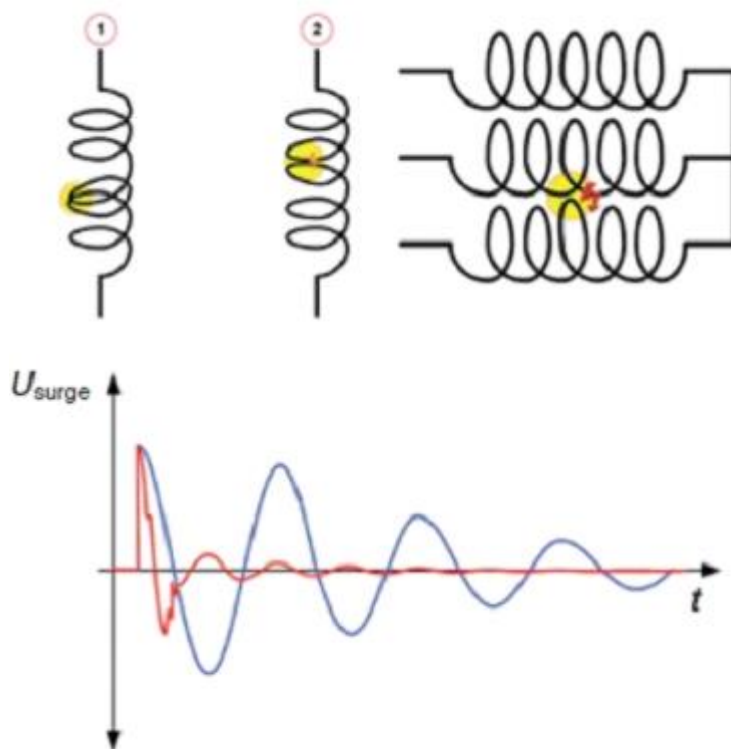
Pro ověření takovýchto situací lze snadno použít test rázovou vlnou. Při tomto testu je na jednotlivé cívky postupně přiloženo napětí z předtím nabitého kondenzátoru, jak je naznačeno na obr. 7.05. Na takto vzniklém rezonančním obvodu se objeví tlumené kmitání. Časový průběh tohoto kmitání charakterizuje stav vinutí. Změna periody a pokles amplitudy tohoto napětí na cívce jsou dány počtem závitů, indukčností cívky, stejnosměrným odporem i parazitními kapacitami vůči kostře motoru atd. V ideálním případě tedy např. při testu třífázového motoru budou tyto tlumené vlny mít stejný tvar pro všechny tři cívky. V praxi se budou v dobrém stavu vinutí lišit velmi málo (obr. 7.06). Při jakékoliv změně počtu závitů se tento stav projeví ve tvaru tohoto vlnění, a lze tak velmi snadno odhalit např. mezizávitový zkrat nebo zkrat mezi vinutími dvou cívek apod., jak je naznačeno na obr. 7.07, kde červený průběh je z napěťově závislého zkratu mezi dvěma cívkami motoru.



Obr. 7.05: Test rázovou vlnou



Obr. 7.06: Výsledky pro cívky v dobrém stavu



Obr. 7.07: Mezizávitový zkrat

### Měření odporu cívek mikroohmmetrem

Další možností ověření stavu motoru je i měření odporu cívek mikroohmmetrem. Zde je třeba připomenout nutnost použít čtyřvodičovou metodu, která zajistí kompenzaci vlivu měřicích kabelů a přechodového odporu kontaktu připojení. Popsané měřicí metody a několik dalších pro rychlé ověření stavu motoru při údržbě v sobě sdružuje přístroj z produkce německé firmy Schleich nesoucí název MotorAnalyzer 2 (viz obr. 7.08). Měřicí část přístroje obsahuje osm konektorů pro připojení tří fází čtyřvodičově. Lze tedy provést všechny základní testy motoru pohodlně bez přepojování. Pro testy s napětím nad 3 kV jsou dvě samostatné bezpečné vn svorky. Lze tedy měřit izolaci a elektrickou pevnost do 6 kV – izolační odpor od 1 M $\Omega$  do 99 G $\Omega$ .



**Obr. 7.08: MotorAnalyzer 2**

Přístroj měří PI a DAR. Dále obsahuje 3 kV rázový generátor pro vlastnostní ověření vinutí, nízkonapěťový zdroj pro čtyřvodičové měření odporů vinutí v rozsahu od 1 m $\Omega$  do 499 k $\Omega$ , nízkonapěťový zdroj pro měření odporu připojení k PE v rozsahu 0 až 1  $\Omega$  a reléové pole pro připojování měřicích signálů k příslušným svorkám motoru při automatickém testu.

### Doplňkové testy

Mezi doplňkové testy patří např. měření indukčnosti jednotlivých cívek a kapacity vinutí vůči kostře, test směru otáčení motoru před jeho připojením k síti, hledání neutrální zóny komutátoru, hledání mezizávitového zkratu pomocí přídavné sondy – to je test již pro servisní činnost při opravě motoru.

Pro snadné a rychlé testování při údržbě je MotorAnalyzer2 vybaven režimem automatického testování, při kterém jsou změřeny odpory a indukčnosti všech cívek a výpočet impedance, izolační odpor vůči kostře napětím nastavitelným od 0 až 3 000 V a nakonec je proveden rázový test na všech vinutích. To vše po jediném zmáčknutí červeného tlačítka bez nutnosti přepojování měřicích kabelů na jiné svorky v přístroji, protože o přivedení správného signálu na správnou svorku se postarají relé uvnitř přístroje.

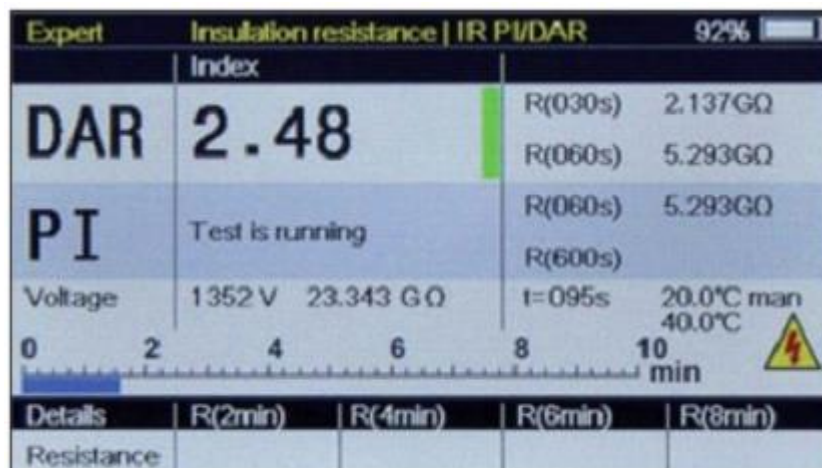
Na obr. 7.09 je vidět výsledek automatického testu motoru, na obr. 7.10 průběh PI testu a na obr. 7.11 výsledek testu rázovou vlnou. Tento test na MotorAnalyzer 2 dále umožňuje automatické krokování s rostoucím napětím až k přednastavené hodnotě. Lze tak snadno



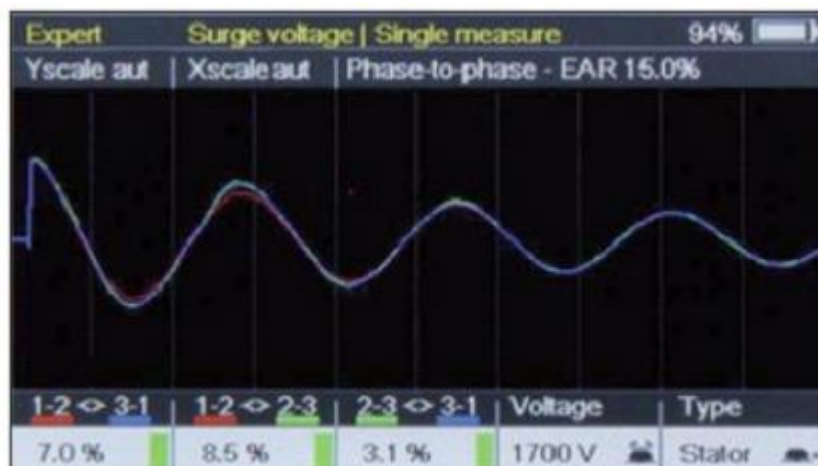
nalézt napětově závislý průraz vinutí. Jak je vidět, pravidelná kontrola výše popsaných parametrů motoru může zásadně zlepšit představu o jejich stavu a možné přibližující se havárii a pro tuto činnost se MotorAnalyzer 2 může stát velmi výkonným pomocníkem.

Expert		Autotest   Motor 400V   Motor			99%
Test	1-2	1-3	2-3	Test at	
Resistance	2.781 Ω	2.781 Ω	2.779 Ω	26.7°C	
Deviation	0.1 %			20.0°C-Cu max. 5.0%	
Inductance	5.028mH	4.996mH	5.028mH	50Hz	
Deviation	0.6 %			max. 5.0%	
Impedance	3.261 Ω	3.258 Ω	3.255 Ω	26.7°C	
Deviation	0.1 %			max. 5.0%	
<b>1-2-3 ↔ housing</b>					
Capacity	33.676 pF			4000Hz	
Insulation	disabled			500V min. 2MΩ	
<b>1-2 ↔ 1-3   1-2 ↔ 2-3   1-3 ↔ 2-3</b>					
Surge	disabled	disabled	disabled	1800V max. 5.0%	

Obr. 7.09: Výpis automatického testu motoru



Obr. 7.10: průběh PI testu



Obr. 7.11: Výsledek testu rázovou vlnou



## 7.2 Kontrola teploty pohonu

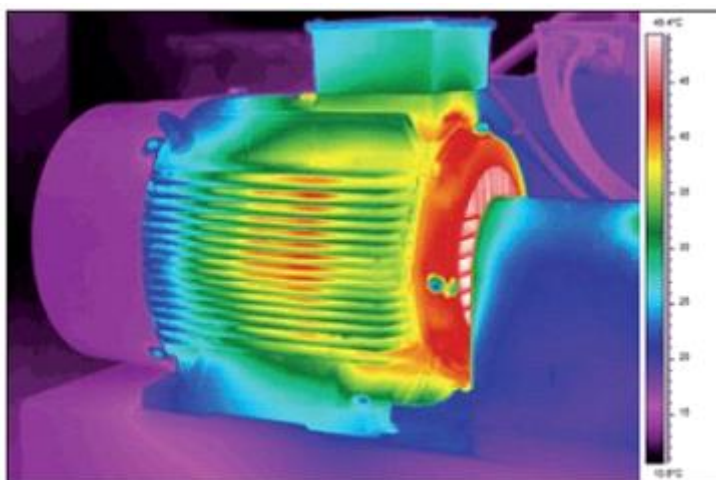
Je možné konstatovat, že všechny škodlivé jevy, nebo lépe odchylky od optimálního stavu, se určitým způsobem projevují krom jiného vždy i změnou teploty v místě jejich působení. Kontrolou teploty jednotlivých částí pohonu lze tedy identifikovat změnu, a tak i určit místo potřebného dalšího měření nebo určit místo vznikajícího problému.

Kontrolovat teplotu je možné v současnosti velmi pohodlně a efektivně využitím bezkontaktní metody kontroly stavu termokamerou.

Využití termokamery ke kontrole stavu pohonu, stejně jako její využití v jiných oblastech, má několik podmínek, které je třeba splnit, aby tato práce byla k užítku. Nelze použít jakoukoliv kameru a spoléhat na to, že na displeji všech je vidět stejný barevný obraz. Sortiment termokamer na trhu je nyní velmi široký a vlastnosti jednotlivých modelů a typů se velmi odlišují.

Proto při volbě vhodné kamery pro účel měření na pohonech není vůbec dobrý nápad jako hlavní kritérium vhodnosti používat cenu. Trh je i v tomto případě velmi konkurenční, a proto výrobci sami již dávno optimalizovali jednotlivé modely pro dané použití. Lze říci s velkou jistotou, že levná kamera, tedy kamera v ceně desítek tisíc korun, bude buď levným modelem renomovaného výrobce, naprosto nevhodným pro oblast měření v údržbě, nebo levnou kamerou, možná sice nesoucí logo významné značky, ale většinou z jiného oboru, než je termovize (a tudíž s velkou pravděpodobností vyráběnou i konstruovanou v Číně, popř. je kamera přímo produktem některého z mnoha čínských výrobců). Zde je velké riziko, že parametry takové kamery budou nevalné.

Například nesymetrie napětí na motoru 1 % vyvolá až 9 % nesymetrii proudu, tedy příslušná část vinutí motoru se ohřívá více než ostatní. Ohříváním vinutí motoru se zkracuje životnost izolace vinutí a dochází k poruše motoru. Různé ohřívání se projeví na povrchové teplotě pláště motoru (obr. 7.12).



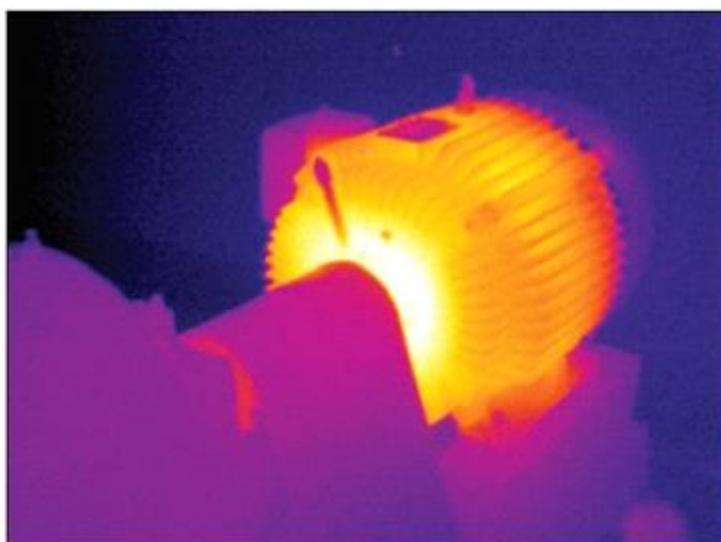
Obr. 7.12: Měření povrchové teploty pláště motoru

Nesymetrie odebíraného proudu se může projevit i nestejným ohříváním svorek motoru (obr. 7.13).



**Obr. 7.13: Nestejná teplota na svorkovnici motoru**

Stejně však se může projevit i přechodový odpor na svorkovnici. Kontrolovat rozložení teploty je tedy vhodné na všech částech pohonu konče svorkami motoru i ložiska motoru (obr. 7.14), popř. i hnané části.



**Obr. 7.14: Kontrola ložisek motoru**

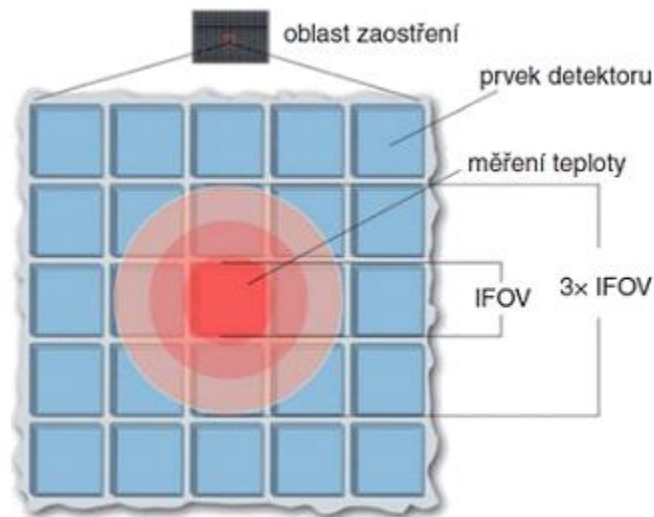
Zde je třeba připomenout, že termokamerou se měří vždy povrchová teplota a že vnitřní teplota vlastního vinutí motoru bude asi o 10 °C vyšší než teplota povrchu motoru. Dále zde do hry vstupuje i emisivita povrchu tělesa motoru. Je tedy třeba na kameře nastavit příslušný materiál nebo jeho emisivitu. Všechny termokamery vhodné pro použití v údržbě pohonů toto nabízejí.

Dále je při měření teploty nutné dbát na správné zaostření na měřené místo. Nezaostřený snímek může mít chybu až 5 °C. Například kamery Fluke řady Ti300 nebo Ti400 (obr. 7.15) mají automatické ostření pomocí laserového měření vzdálenosti, a tak je možné zaostřit na potřebné místo i přesto, že se měří např. za plotem. Kamery s jiným způsobem zaostřování, např. podobným, které používají běžné fotokamery, toto nezvládnou a zaostří se na plot.

Po takovémto vyhodnocení situace je třeba se ptát po příčinách takovéto změny teploty v daném místě a zkontrolovat elektrické poměry na svorkách pohonu měřením analyzátozem. Pravidelnou kontrolou teplotního stavu pohonů lze zjistit jeho počínající možné selhání a pohon nebo motor včas nahradit bezvadným, pohon nebo motor s počínající závadou opravit s nižšími náklady, než kdyby byl provozován až do zničení.



**Obr. 7.15: Kamera Fluke Ti400**



Obr. 7.16: Oblast vyhodnocení jednoho senzoru kamery

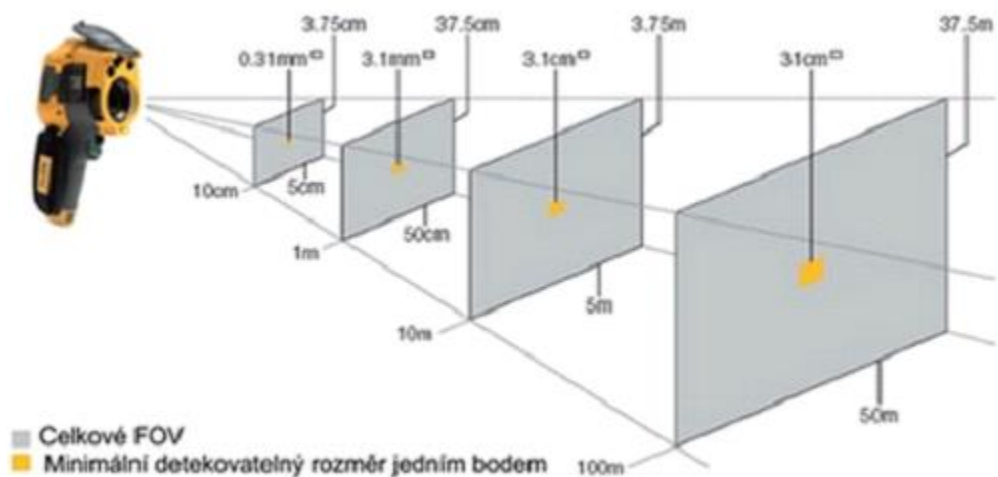
### Volba termokamery

A teď krátce něco k volbě vhodné kamery, i když se může zdát, že všechny kamery jsou stejné, neboť na displeji je stejný barevný obraz.

Důležité pro správné vyhodnocení měřené teploty je kromě vhodné emisivity i rozlišení kamery a vzdálenost, ze které se měří. Jednoduše řečeno, čím dále je obsluha kamery od měřeného místa a kamera má menší rozlišení, tím větší plochu měřeného místa kamera vyhodnocuje.

Na obr. 7.16 je patrná oblast vyhodnocení jednoho senzoru kamery. Jestliže se nejmenší bod, jehož teplotu je třeba změřit, promítne z měřené vzdálenosti dovnitř plochy senzoru, je měřena skutečná teplota tohoto bodu. Lépe je tento stav patrný na obr. 7.17. Parametru, který určuje tuto schopnost kamery, se říká IFOV a je většinou udáván v miliradiánech. Jednoduše řečeno, pro nejmenší dovolenou vzdálenost, ze které je možné měřit, se získává minimální potřebné rozlišení kamery.

Tedy z jedné strany je omezen minimální počet měřících prvků kamery bezpečností práce – minimální vzdáleností, kam až se lze k měřenému předmětu bezpečně přiblížit. V elektrotechnice je to obvykle 80 cm. A naproti tomu, z jaké největší vzdálenosti přesně chce obsluha měřit teplotu, tedy jak velký bod z dané vzdálenosti se promítne na senzor. Pro měření v údržbě pohonů se touto úvahou dospěje k počtu bodů minimálně  $240 \times 180$  a více.



Obr. 7.17: Minimální detekovatelný rozměr

## Příklad pohonu

### Třífázová hnací jednotka VX54

Třífázová hnací jednotka VX54 je uložena ve skříni v podobě hliníkového tlakového odlitku a je ve dvojici s 1stupňovou převodovkou 0CZ sloučena do jednoho zástavbového dílu.



Obr. 7.18: Třífázová hnací jednotka VX54

## Konstrukční uspořádání

---

Třífázová hnací jednotka VX54 v sobě zahrnuje trakční motor V141, snímač teploty trakčního motoru G712, snímač 1 polohy rotoru trakčního motoru G713, přípojky chladicí kapaliny a tři fázové přípojky.



## Trakční motor elektrického pohonu V141

---

Trakční motor elektrického pohonu V141 přeměňuje třífázové napětí na hnací sílu. Uvnitř se otáčející rotor je vyvážen a udržován ve svojí poloze prostřednictvím dvou ložisek. Nepoužívá-li se trakční motor elektrického pohonu V141 jako trakční motor, přebírá funkci generátoru.



## 8 Bezpečnost práce

Jelikož v rámci elektromobility hovoříme o práci na elektrickém zařízení, je nutno z hlediska bezpečnosti zabývat se:

- Ochranou před úrazem elektrickým proudem
- Obsluhou a prací na elektrických zařízeních
- Odbornou způsobilostí pracovníků v elektrotechnice

### 8.1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem

Norma ČSN 33 2000-4-41 ed.2specifikuje základní požadavky týkající se ochrany před úrazem elektrickým proudem včetně základní ochrany (ochrany před přímým dotykem neboli před dotykem živých částí) a ochrany při poruše (ochrany před nepřímým dotykem neboli ochrany před dotykem neživých částí) osob a hospodářských zvířat. Norma se zabývá v zásadě ochranou v prostorech z hlediska nebezpečí úrazu elektrickým proudem normálních a nebezpečných.

Základním pravidlem ochrany před úrazem elektrickým proudem je to, že nebezpečné živé části nesmějí být za normálních podmínek přístupné a přístupné vodivé části nesmějí být nebezpečné ani za normálních podmínek, ani za podmínek jedné poruchy.

Ochrana je za normálních podmínek zajištěna základními ochrannými opatřeními a ochrana za jedné poruchy je zajištěna opatřeními pro ochranu při poruše. Jinak je ochrana před úrazem elektrickým proudem zajištěna prostředkem zvýšené ochrany, která zajišťuje jak ochranu za normálních podmínek, tak ochranu při jedné poruše.

#### Úraz elektrickým proudem

Úraz elektrickým proudem může být způsoben proudem protékajícím postiženým tělem, jehož velikost překročí určitou bezpečnou mez, nebo může vzniknout v důsledku jiných nežádoucích účinků elektrického proudu, např. popálením nebo působením elektrického či elektromagnetického pole, nebo i dlouhodobým účinkem na lidské zdraví (u stejnosměrného proudu).

**Proud protéká lidským tělem, jestliže se na různých místech dotýká současně částí s různým potenciálem. To je při:**

- a) dotyku nebezpečných živých částí, které mají potenciál proti zemi, nebo při dotyku částí se živými částmi spojenými, nebo jenom při přiblížení se k živým částem (vysokého napětí) – proud protéká lidským tělem mezi místem dotýkajícím se živé části a místem styku se zemí – obvykle nohama
- b) současném dotyku nebezpečných živých částí různé polarity nebo rozdílných potenciálů, nebo při přiblížení se k nim
- c) dotyku neživých částí, na kterých se při poruše mohou objevit nebezpečná napětí

## **Lidé a hospodářská zvířata musí být chráněni před nebezpečím, které může nastat:**

- a) při dotyku nebezpečných živých částí:
  - buď zabráněním vzniku možnosti průtoku proudu tělem člověka, nebo zvířete (např. nepřístupností živých částí, tzn. jejich izolací, uzavřením v krytu apod.)
  - nebo omezením proudu, který by mohl téci tělem, na úroveň nižší, než je proud způsobující úraz
- b) při dotyku neživých částí, které se stanou živými při poruše:
  - buď zabráněním možnosti průtoku proudu tělem člověka, nebo zvířete při poruše
  - nebo omezením proudu, který by při poruše mohl protékat tělem, na úroveň nižší, než je proud způsobující úraz
  - nebo automatickým odpojením od zdroje místa poruchy, pokud by tělem dotýkajícím se neživých částí protékal proud rovný nebo větší, než je proud způsobující úraz
- c) při jiných nežádoucích účincích elektrického proudu
  - buď vhodným umístěním zařízení, nebo vhodným krytem
  - nebo použitím ochranných pomůcek

### **Prostory z hlediska nebezpečí úrazu elektrickým proudem**

Z hlediska velikosti nebezpečí úrazu elektrickým proudem, které může vzniknout při provozu elektrického zařízení, se s ohledem na vnější vlivy a jejich působení prostory člení na:

- prostory normální
- prostory nebezpečné
- prostory zvlášť nebezpečné

Toto členění je určující pro stanovení požadavků na doplňkovou ochranu a na kombinaci ochranných opatření

## Meze bezpečných malých napětí

Meze bezpečných malých napětí závisí na prostoru, ve kterém je elektrické zařízení umístěno a ve kterém vykonává svou funkci.

Prostory	Dochází-li při obsluze k dotyku částí zařízení	Nejvyšší bezpečná malá napětí živých částí	
		Střídavá <sup>1)</sup> [V]	Stejnoseměrná <sup>2)</sup> [V]
Normální i nebezpečné	živých	25	60
	krytů <sup>3)</sup>	50	120
Zvlášť nebezpečné	živých	-	-
	krytů <sup>3)</sup>	12	25 (30)

<sup>1)</sup> Jmenovitá efektivní napětí se volí v daném rozsahu tak, aby nebyla překročena uvedená hodnota. Maximální hodnoty pro nesinusový průběh zatím nejsou stanoveny.

<sup>2)</sup> Stejnoseměrná napětí jsou bez zvlnění. Pojem „bez zvlnění“ se zpravidla definuje jako efektivní hodnota zvlněného napětí nepřesahující 10 % stejnoseměrné složky.

<sup>3)</sup> Rozumí se krytů izolovaných od živých částí.

## Konvenční meze dovolených dotykových napětí

Konvenční mezní hodnoty dovolených dotykových napětí udává tato tabulka. Tyto hodnoty jsou podloženy především dlouhodobými zkušenostmi, je však možno je zdůvodnit i velikostmi proudů, které mohou v uvedených případech, při jejich dotyku lidským tělem protékat.

Za bezpečná proti zemi se považují nejvýše tato napětí [V]				
v prostorech	střídavá		stejnoseměrná	
	působící			
	Trvale	krátkodobě <sup>1)</sup>	trvale	krátkodobě <sup>1)</sup>
normálních i nebezpečných	25	50	60	120
zvlášť nebezpečných	-	12	-	25

<sup>1)</sup> Za krátkodobé se považuje působení v době, kdy je zařízení nebo elektrická instalace v poruše, než tato porucha bude odstraněna.

## Ochranné opatření

### Ochranné opatření musí sestávat z:

- vhodné kombinace opatření pro zajištění základní ochrany a nezávislého opatření pro zajištění ochrany při poruše, nebo
- zvýšené ochrany, která zajišťuje jak ochranu základní, tak ochranu při poruše (příkladem zvýšené ochrany je zesílená izolace)

V každé části instalace musí být uplatněno jedno ochranné opatření nebo více těchto opatření, přičemž se berou v úvahu podmínky vnějších vlivů.

### Všeobecně jsou povolena tato ochranná opatření:

- automatické odpojení od zdroje
- dvojitá nebo zesílená izolace
- elektrické oddělení pro napájení jednoho spotřebiče
- malé napětí (SELV a PELV)

## Prostředky základní ochrany

Prostředky základní ochrany se zajišťuje ochrana za normálních podmínek. Uplatňují se tam, kde je to určeno jako součást vybraných ochranných opatření.

1. **Základní izolace živých částí**
2. **přepážky nebo kryty**
3. **Zábrany a ochrana polohou (umístěním mimo dosah)**

Ochranná opatření, která se uplatňují pouze, jestliže je provoz instalace řízený osobou znalou, nebo je pod jejím dozorem

- nevodivé okolí
- neuzemněné pospojování
- elektrické oddělení pro napájení více než jednoho spotřebiče

## Požadavky na ochranu při poruše (před dotykem neživých částí)

V sítích TN mohou být pro ochranu při poruše použity následující ochranné přístroje:

- nadproudové ochranné přístroje
- proudové chrániče (nesmí být používán v síti TN-C)

## Ochranné uzemnění a ochranné pospojování

Neživé části musí být spojeny s ochranným vodičem a toto spojení musí splňovat přesně stanovené podmínky odpovídající způsobu uzemnění sítě. Neživé části, které jsou současně přístupné dotyku, musí být spojeny se stejnou uzemňovací soustavou, a to buď jednotlivě, po skupinách, nebo společně. Každý obvod musí obsahovat ochranný vodič spojený k příslušné uzemňovací soustavě.

## Ochranné pospojování

V každé budově musejí být do tzv. ochranného pospojování vzájemně spojeny ochranný vodič, uzemňovací přívod a níže uvedené vodivé části:

- kovová potrubí uvnitř budovy pro zásobování např. plynem, vodou
- konstrukční kovové části, pokud jsou při normálním použití dosažitelné, kovové ústřední topení a klimatizace
- kovová konstrukční výztuž betonu v případech, kdy je tato výztuž přístupná a spolehlivě propojená

Jsou-li takové části přiváděné do budovy zvenku, musí být pospojovány, pokud možno, co nejbližší k místu, kde vstupují do budovy. Jakékoliv pláště telekomunikačních kabelů musí být spojeny s ochranným pospojováním. Přitom je však nutno brát v úvahu požadavky majitele nebo operátora těchto kabelů.

## Zařazení stupně ochrany při poruše (neživých částí)

Zařazení jednotlivých druhů ochrany neživých částí, případné opatření k dosažení správného působení ochrany nebo jejího zvýšení jsou uvedeny v této tabulce:

Stupeň ochrany	Druh ochrany a doplňková ochrana, kterými se dosáhne požadovaný stupeň ochrany
normální	<b>1. automatické odpojení od zdroje</b>
	<b>2. dvojitá nebo zesílená izolace</b>
	<b>3. elektrické oddělení</b>
	<b>4. ochrana malým napětím SELV a PELV</b>
doplňená	<b>1. automatické odpojení od zdroje a</b>
	a) doplňující pospojování, nebo b) chránič, nebo

	c) doplňková izolace
	<b>2. dvojí nebo zesílená izolace a</b>
	a) elektrické oddělení, nebo
	b) chránič, nebo
	c) doplňková izolace
	<b>3. elektrické oddělení pro napájení pouze jediného spotřebiče a</b>
	a) izolace vstupních míst a pohyblivých přívodů, nebo
	b) chránič, nebo
	c) doplňková izolace
	<b>4. ochrana malým napětím SELV a PELV a</b>
	a) omezení napětí živých částí na AC 12 V, DC 25 V a
	b) krytí nebo izolace živých částí i při omezení jejich napětí

#### Doplňková ochrana proudovým chráničem

- u zásuvek, jejichž jmenovitý proud nepřekračuje 20 A, které jsou používány laiky (osobami bez elektrotechnické kvalifikace) a jsou určeny pro všeobecné použití
- u mobilních zařízení určených pro venkovní použití, jejichž jmenovitý proud nepřesahuje 32 A. Výjimkou mohou být:
  - zásuvky určené k použití pod dozorem znalé nebo poučené osoby, např. v některých komerčních nebo průmyslových provozech, nebo
  - zvláštní zásuvka určená pro připojení speciálního druhu zařízení, (kancelářské a výpočetní techniky, nebo pro chladničky, tj. pro napájení zařízení, jehož nežádoucí vypnutí by mohlo být příčinou značných škod).

Jestliže je proudový chránič používán v síti TN-C-S, nesmí být vodič PEN použit za chráničem na straně zátěže. Spojení ochranného vodiče s vodičem PEN musí být provedeno před chráničem, tj. na straně zátěže.

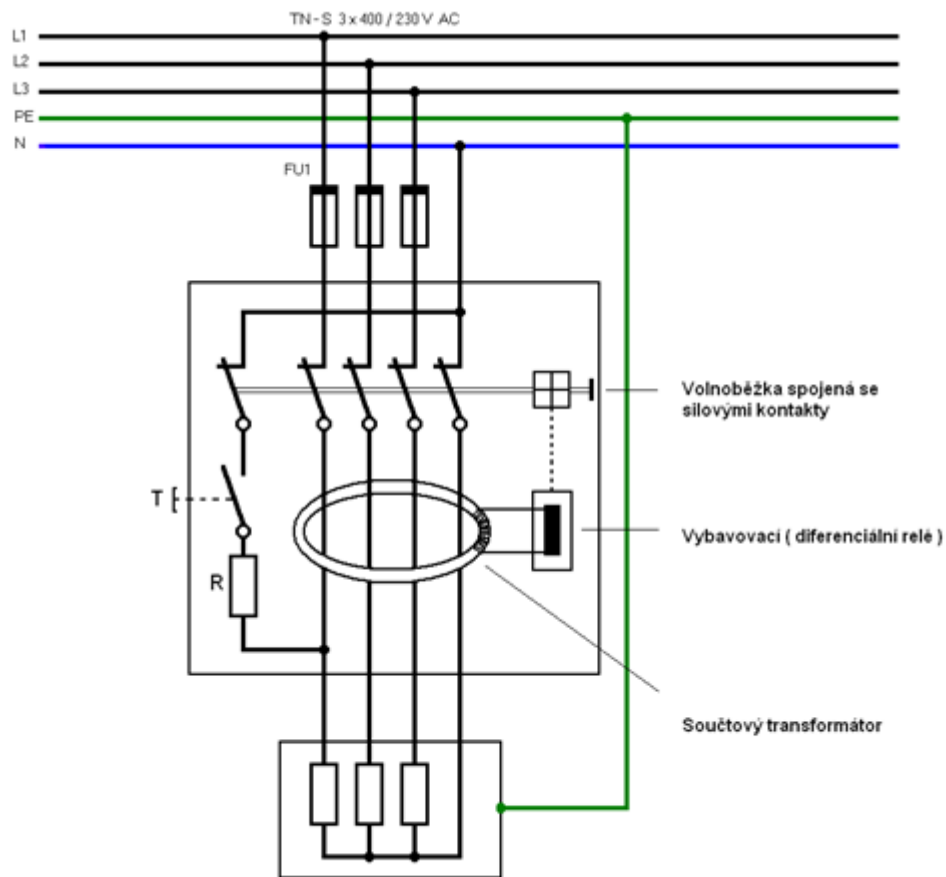
Proudový chránič je přístroj, který dokáže ochránit člověka při dotyku těla (ruky, nohy apod.) s živou částí, například na vodiči s porušenou izolací, na fázi u zásuvky atd., dokáže ochránit člověka při dotyku těla s neživou částí, např. na vodivou kostru elektromotoru, vodivou kostru



sekačky atd., která je pod napětím z důvodu poruchy stroje, dokáže ochránit budovy před vznikem požáru, nebo chránit elektrická zařízení před vznikem zkratu.

**Proudový chránič se skládá ze tří hlavních částí:**

1. Součtový transformátor proudu – snímá rozdíl proudů
2. Vybavovací (diferenciální relé) – rozdíl proudů vyhodnocuje a převádí na mechanický pohyb
3. Volnoběžka spojená se silovými kontakty – mechanický pohyb diferenciálního relé použije k rozepnutí silových kontaktů



**Obr. 8.01: Proudový chránič**

Součtový transformátor proudu má magnetický obvod a dvě vinutí. První vinutí – primární, tvoří fázové vodiče L1, L2, L3 a pracovní vodič N. Druhé vinutí – sekundární, tvoří cívka, která napájí diferenciální relé.

### Funkce proudového chrániče:

Pokud za proudovým chráničem nastane únik proudu, je okamžitý součet proudů všech pracovních vodičů primárního vinutí různý od nuly – vznikl reziduální proud  $I -$  (rozdílový).

V sekundárním vinutí se indukuje napětí, které přes diferenciální relé a volnoběžku rozpojí silové kontakty. Přístroj odpojí poruchu. K odpojení dojde tehdy, když reziduální proud nabude určitou část předem – výrobně nastavené velikosti proudu. Výrobou nastavená velikost reziduálního proudu se označuje jako jmenovitý reziduální proud  $I_n$ .

### Testovací tlačítko:

Pro ověření správné funkce proudového chrániče slouží testovací obvod s testovacím tlačítkem a rezistorem zapojeným v sérii. Stisknutím testovacího tlačítka simulujeme únik proudu, čímž dojde k vybavení proudového chrániče.

Testování se provádí v pravidelných intervalech, které uvádí výrobce. Nejdelší přípustný interval je 6 měsíců.

### Funkční malé napětí (FELV)

Základní ochrana musí být zajištěna buď

- základní izolací, která odpovídá jmenovitému napětí vstupního (primárního) obvodu, nebo
- přepážkami, nebo kryty

Neživé části obvodu FELV musí být spojeny s ochranným vodičem vstupního (primárního) obvodu zdroje. Přitom se předpokládá, že vstupní obvod je chráněn automatickým odpojením od zdroje.

Zdrojem sítě FELV musí být buď transformátor alespoň s jednoduchým oddělením vinutí.

### Ochranné opatření: dvojitá nebo zesílená izolace

Toto ochranné opatření je určeno k tomu, aby zabránilo výskytu nebezpečného napětí na přístupných částech elektrických zařízení v důsledku poruchy základní izolace.

Dvojitá nebo zesílená izolace je ochranné opatření, u něhož:

- základní ochrana je zajištěna základní izolací, ochrana při poruše přidavnou izolací, nebo
- základní ochrana i ochrana při poruše jsou zajištěny zesílenou izolací mezi nebezpečnými živými částmi a přístupnými částmi

### Ochranné opatření: elektrické oddělení

Elektrické oddělení je ochranné opatření u něhož:

- základní ochrana je zajištěna základní izolací živých částí nebo přepážkami a kryty a
- ochrana při poruše je zajištěna jednoduchým oddělením obvodu od ostatních obvodů a od země

### Ochrana při elektrickém oddělení musí být zajištěna splněním těchto požadavků:

- oddělené obvody musí být napájeny ze zdroje alespoň s jednoduchým oddělením, jehož napětí nepřesahuje 500 V
- živé části odděleného obvodu nesmějí být v žádném bodě spojeny s jiným obvodem ani se zemí a ani s ochranným vodičem
- aby se zajistilo elektrické oddělení, musí být provedena taková opatření, aby mezi obvody bylo dosaženo základní izolace
- ohebné kabely a šňůry musí být viditelné po celé délce na všech svých částech, na nichž je nebezpečí jejich mechanického poškození

Pro oddělené obvody se doporučuje použití oddělených rozvodů. Neživé části oddělených obvodů nesmí být spojeny ani s ochranným vodičem ani s neživými částmi ostatních obvodů se zemí.

### Ochranné opatření: ochrana malým napětím SELV a PELV

Ochrana malým napětím je ochranné opatření, které je založeno na jedné ze dvou různých sítí malého napětí:

- SELV nebo
- PELV

Toto ochranné opatření vyžaduje:

- omezení napětí v síti SELV nebo PELV horní mezí napěťového pásma I, tj. 50 V pro střídavé a 120 V pro stejnosměrné napětí a
- ochranné oddělení sítě SELV a PELV od všech ostatních sítí jiných než SELV a PELV a základní izolaci mezi sítí SELV a PELV a ostatními sítěmi SELV a PELV
- pouze u sítí SELV základní izolaci mezi sítí SELV a zemí.

Použití SELV a PELV je považováno za ochranné opatření účinné za jakýchkoliv okolností.

### Doplňková ochrana: doplňující ochranné pospojování

Doplňující ochranné pospojování se považuje za doplnění ochrany při poruše, může zahrnovat celou instalaci, její část, jednotlivé přístroje, nebo prostor.

Doplňující ochranné pospojování musí zahrnovat všechny neživé části upevněných zařízení současně přístupných dotyku a cizí vodivé části včetně, pokud je to proveditelné, hlavních kovových armatur železobetonu. Systém ochranného pospojování musí být spojen s ochrannými vodiči všech zařízení včetně zásuvek.

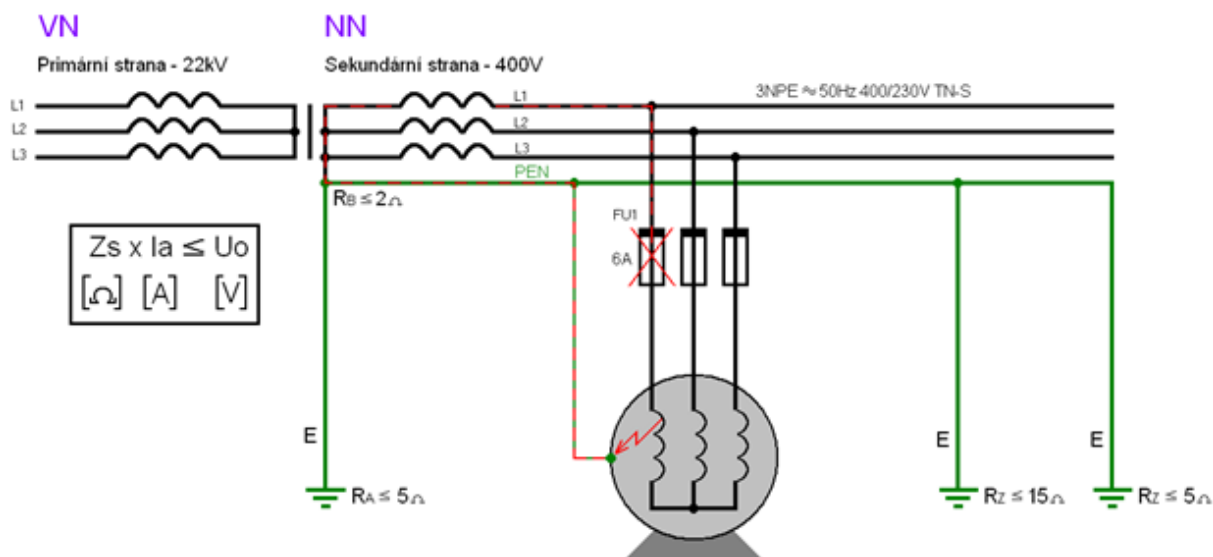
### Ochranné opatření: automatické odpojení od zdroje v síti TN

Ochranný přístroj musí automaticky přerušit napájení vodičů vedení (pracovních vodičů) obvodu nebo zařízení v případě poruchy o zanedbatelné impedanci mezi vodičem vedení a neživou částí nebo ochranným vodičem obvodu nebo zařízení v požadované době odpojení.

#### **Automatické odpojení od zdroje je ochranné opatření, jehož:**

- základní ochrana je zajištěna základní izolací živých částí nebo přepážkami nebo kryty, a
- ochrana při poruše je zajištěna ochranným pospojováním a automatickým odpojením v případě poruchy

K automatickému odpojení od zdroje při poruše mezi fází (vodičem pod napětím) a neživou částí spojenou s nulovým bodem zdroje dochází v důsledku průchodu poruchového, v podstatě jednofázového zkratového proudu, na který zareaguje ochranný přístroj obvodu, v němž došlo k poruše, a tento obvod je uvedeným přístrojem odpojen od napájení (vodičů vedení). Obvodu poruchového proudu říkáme smyčka.



Obr. 8.02: Poruchová smyčka

$R_A$  - odpor uzemnění nulového bodu (uzlu) zdroje nebo pracovně uzemněného místa zdroje nemá být větší než  $5 \Omega$ , ve ztížených půdních podmínkách max.  $15 \Omega$ .

$R_B$  - celkový odpor uzemnění vodičů PEN odcházejících vedení z transformovny včetně uzemněného středu (uzlu) zdroje, nemá však být pro sítě o jmenovitém napětí  $U_0 = 230 \text{ V}$  větší než  $2 \Omega$ .

$R_Z$  - odpor zemniče v průběhu a na konci vedení.

Charakteristiky ochranných přístrojů a impedancí musí splňovat tento požadavek:

$Z_s \times I_a \leq U_0$		
$[\Omega]$	$[A]$	$[V]$

$Z_S$  - impedance poruchové smyčky, obsahující zdroj, vodič vedení až k místu poruchy a ochranný vodič mezi místem poruchy a zdrojem.

$I_a$  - proud vyvolávající automatickou funkci přístroje způsobujícího odpojení v předepsaném čase.

$U_0$  - jmenovité střídavé nebo stejnosměrné napětí proti zemi.

V síti TN je podstatné, aby jednofázový zkratový proud v místě, ve kterém je instalováno zařízení (spotřebič, nářadí či kovová rozvodnice), u něhož je třeba zajistit ochranu před dotykem jeho neživých částí při poruše, byl větší než proud, který zajišťuje vybavení ochranného prvku.

**Porucha musí způsobit takový zkrat, v jehož důsledku dojde k odpojení vadné části dřívě, než obsluha nebo jiné osoby dotýkající se neživých částí vůbec něco pocítí.**

## 8.2 Obsluha a práce na elektrických zařízeních

Tato evropská norma platí pro obsluhu a práci na elektrických zařízeních, s elektrickými zařízeními nebo v jejich blízkosti. Jedná se o elektrická zařízení provozovaná s úrovní napětí od malého včetně až po vysoké napětí včetně.

### ČSN EN 50 110-1 ed.3 Obsluha a práce na elektrických zařízeních

#### Definice

**Elektrické zařízení** – zahrnuje všechna elektrická zařízení, která jsou určena pro výrobu, přenos, přeměnu, rozvod a užití elektrické energie, zahrnuje zdroje energie, jako jsou baterie, kondenzátory a všechny další zdroje akumulované elektrické energie.

**Obsluha a práce** – zahrnuje všechny pracovní činnosti nutné k uvedení elektrického zařízení do chodu, zahrnuje takové úkony, jako je spínání, ovládání, monitorování, údržba a také práce na elektrických zařízeních a neelektrické práce.

**Obsluha elektrického zařízení** - jsou pracovní úkony spojené s provozem elektrického zařízení, například spínání, monitorování, čtení údajů, regulování, kdy se osoby zásadně dotýkají jen částí, které jsou k tomu určené.

**Práce na elektrickém zařízení** – výstavba, montáž, revize a údržba elektrického zařízení. Práce mohou být prováděny na zařízení bez napětí, na zařízení pod napětím a v blízkosti živých částí. Podle způsobu práce prováděné na elektrickém zařízení se jedná o práce podle pokynů, práce s dohledem a o práce pod dozorem.

**Práce podle pokynů** – je práce, pro kterou jsou dány jen nejnnutnější pokyny. Za dodržování bezpečnostních předpisů zodpovídají pracující osoby samy.

**Práce s dohledem** – je práce, která se provádí podle podrobnějších pokynů. Před zahájením práce se osoba provádějící dohled přesvědčí, zda jsou provedena nutná bezpečnostní opatření. V průběhu prací, občas podle potřeby, kontroluje osoba provádějící dohled dodržování bezpečnostních předpisů. Za dodržování bezpečnostních předpisů zodpovídají pracující osoby samy.

**Práce pod dozorem** – je práce, která se provádí za trvalé přítomnosti osoby, která je pověřena dozorem a která je odpovědná za dodržování příslušných bezpečnostních předpisů.

**Riziko** – kombinace pravděpodobnosti a stupně možného zranění nebo poškození zdraví osoby, která je vystavena riziku nebo rizikům.

**Elektrické riziko** – zdroj možného zranění nebo poškození zdraví působením elektrické energie z elektrického zařízení.

**Elektrické nebezpečí** – je riziko zranění od elektrického zařízení.



**Zranění (způsobená elektřinou)** – smrt nebo zranění osoby způsobené elektrickým proudem, popálením elektrickým obloukem, ohněm nebo výbuchem způsobeným elektrickou energií při obsluze nebo práci na elektrickém zařízení.

**Vedoucí práce** – pověřená osoba s konečnou odpovědností za pracovní činnost. Pokud je požadováno, mohou být některé odpovědnosti přeneseny na jiné osoby.

**Osoba odpovědná za elektrické zařízení** – pověřená osoba s konečnou odpovědností za stav a provoz elektrického zařízení. Pokud je to vyžadováno, mohou být některé odpovědnosti přeneseny na jiné osoby.

**Osoba znalá (v elektrotechnice)** – osoba s odpovídajícím vzděláním, znalostmi a zkušenostmi, umožňující jí vyvarovat se nebezpečí a vyhodnotit rizika, která elektřina může vytvořit.

Osoby znalé (§5, §6, §7, §8) mohou:

- samostatně obsluhovat elektrická zařízení
- pracovat na částech elektrického zařízení nn samy, a to na částech bez napětí,
- v blízkosti živých částí a na částech pod napětím
- pracovat na zařízeních vn bez napětí samy, v blízkosti živých částí s dohledem nebo pod dozorem
- pracovat na vypnutých, ale jinak nezajištěných částech zařízení vn s dohledem

**Osoba poučená** – osoba prokazatelně poučená osobami znalými, umožňující jí vyvarovat se nebezpečí, které elektřina může vytvořit.

Osoby poučené (§4) mohou:

- samostatně obsluhovat jednoduchá elektrická zařízení všech napětí
- pracovat na částech elektrického zařízení nn bez napětí, v blízkosti nekrytých živých částí ve vzdálenosti větší než 200 mm s dohledem, na částech pod napětím pracovat nesmějí. Uvedená omezení se netýkají jednoduchých prací, které jsou určeny pracovním postupem schváleným osobou odpovědnou za elektrické zařízení
- pracovat na vypnutých zařízeních vn s dohledem. V blízkosti živých částí smějí pracovat pod dozorem, na částech pod napětím pracovat nesmějí.
- měřit zkoušecím zařízením například při informativních zkouškách výrobků, elektrického nářadí a podobně.

**Osoba seznámená** – osoba, která není ani znalá ani poučená.

Osoby seznámené (§3) mohou:

- samostatně obsluhovat jednoduchá elektrická zařízení mn a nn, provedená tak, že při jejich obsluze nemohou přijít do styku s živými částmi
- pracovat v blízkosti živých částí jen při dodržování stanovených bezpečných vzdáleností, jinak jen se souhlasem osoby odpovědné za elektrické zařízení, která provede potřebná bezpečnostní opatření, například vypnutí zařízení nebo zajištění dozoru.

### 8.3 Odborná způsobilost v elektrotechnice

Vyhláška č.50/1978 Sb.

#### §3 Pracovníci seznámení

Byli organizací v rozsahu své činnosti seznámeni s předpisy o zacházení s elektrickými zařízeními a upozorněni na možné ohrožení těmito zařízeními.

#### §4 Pracovníci poučení

Bez elektrotechnického vzdělání. Byli organizací v rozsahu své činnosti seznámeni s předpisy pro činnost na elektrických zařízeních, školeni v této činnosti, upozorněni na možné ohrožení elektrickými zařízeními a seznámeni s poskytováním první pomoci při úrazu elektrickým proudem.

#### §5 Pracovníci znalí

- mají ukončené odborné vzdělání a po zaškolení složili zkoušku (střední vzdělání v oboru elektrotechniky s výučním listem, nebo střední vzdělání v oboru elektrotechniky s maturitní zkouškou, nebo vysokoškolské vzdělání studijního směru elektrotechnika)

#### §6 Pracovníci pro samostatnou činnost

- splňují požadavky pro pracovníky uvedené v §5
- mají alespoň nejkratší požadovanou praxi,
- prokázali složením další zkoušky znalosti potřebné pro samostatnou činnost.

	do 1 000 V	nad 1 000 V
Vyučení, SŠ, VŠ	1rok	2 roky

## §7 Pracovníci pro řízení činnosti

- splňují požadavky pro pracovníky uvedené v § 6, mají alespoň nejkratší požadovanou praxi, prokázali složením další zkoušky znalosti potřebné pro řízení činnosti.

	do 1 000 V	nad 1 000 V
vyučení	2 roky	3 roky
SŠ, VŠ	1 rok	2 roky

## §8 Pracovníci pro řízení činnosti prováděné dodavatelským způsobem a pracovníci pro řízení provozu

- pracovníci znalí s vyšší kvalifikací (§ 7 nebo v § 6), mají alespoň nejkratší požadovanou praxi, prokázali složením další zkoušky znalosti

	do 1 000 V	nad 1 000 V
vyučení	6 let	7 let
SŠ	4 roky	5 let
VŠ	2 roky	3 roky

## 9 Seznam použité literatury

- 1) <https://www.alza.cz/elektromobily-podrobne>
- 2) <https://fdrive.cz/serialy/historie-elektromobilu>
- 3) <http://www.elektromobily-os.cz/stru%C4%8Dn%C3%A1-historie-elektromobilu>
- 4) Jan, Ždánský, Kubát: Automobily (5)-Elektrotechnika motorových vozidel I, Avid Brno 2012
- 5) Kameš Josef: Alternativní pohon automobilů, BEN Praha 2004
- 6) Hromádko Jan: Speciální spalovací motory a alternativní pohony, Grada Praha 2012
- 7) Bartoš Václav: Elektrické stroje, ZČU Plzeň 1998
- 8) Kůs Václav: Elektrické pohony a výkonová elektronika, ZČU Plzeň 2006
- 9) Elektromobilita, příloha časopisů Automa a Elektro 2011
- 10) <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/mereni-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-9-cast--2111>
- 11) <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/mereni-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-10-cast-jak-a-kde-pomuze-termovize-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru--2112>
- 12) SSP527\_e-upl.pdf (Volkswagen AG, Wolfsburg - servisní školení, samostudijní program 527

**Autor:** Střední odborná škola energetická a stavební, Obchodní akademie a Střední zdravotnická škola, Chomutov, příspěvková organizace

**S přispěním:** International consulting and mobility agency s.l.