

Kurz celoživotního vzdělávání

Elektrotechnické systémy pro environmentálně příznivou dopravu

Předmět

Udržitelné energetické systémy pro dopravu

Studijní materiál

Akumulátory energie – parametry, obvodové modely, nabíjecí charakteristiky

Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.

Ing. Petr Sýkora

Ing. Ladislav Mlynařík, Ph.D.



Základní rozdělení akumulátorů energie

Účel akumulátorů energie: uskladnění některé z forem energie a její následné využití vhodnou aplikací – vlastností akumulátorů je tedy opakovaná schopnost příjmu a výdeje energie

Základní rozdělení akumulátorů:

- **Mechanické** – setrvačník, závaží, přečerpávací elektrárny, apod.
- **Termické** – akumulární kamna, bojler, apod.
- **Chemické** – palivový článok
- **Elektrické** – energie kondenzátoru či cívky
- **Elektro – chemické** – elektrická energie uchována pomocí chemického media

Výběr vhodného akumulátoru energie závisí na charakteru požadované formy energie – každá přeměna energie je provázená ztrátami !



Elektro-chemické akumulátory energie

Při výběru vhodného elektro-chemického akumulátoru (dále jen akumulátoru či článku) je nutno zohlednit charakter jeho aplikace.

- ***Druh aplikace:*** mobilní / statická
- ***Druh provozu:*** kontinuální / přerušovaný
- ***Energetické nároky***
- ***Výkonnostní nároky***
- ***Objemové / hmotnostní nároky***
- ***Životnost***
- ***Bezpečnost***



Hlavní parametry akumulátorů

Napětí článku [V]

Udává jmenovité napětí článku a liší se v závislosti na jeho druhu. Jedná se o střední hodnotu svorkového napětí za definovaného vybíjecího proudu.

- **Olověný:** 2,1V
- **Li-ion, Li-pol:** 2,3 – 3,7V dle typu
- **NiCd:** 1,2V
- **NiMH:** 1,2V

Jmenovité napětí vs. pracovní napětí !!



Kapacita článku C [Ah]

Udává součin proudu odebíraného z článku a času v hodinách, po který je schopen článek tento proud dodávat ze stavu plného nabití.

Podmínky ovlivňující kapacitu článku:

- ***Vybíjecí proud***
- ***Teplota***
- ***Stáří***
- ***U některých článků též kvalita předchozího vybíjecího procesu.
(paměťový efekt, pokles jmenovitého napětí)***

Co zohledňuje jmenovitá kapacita udaná v katalogovém listu?

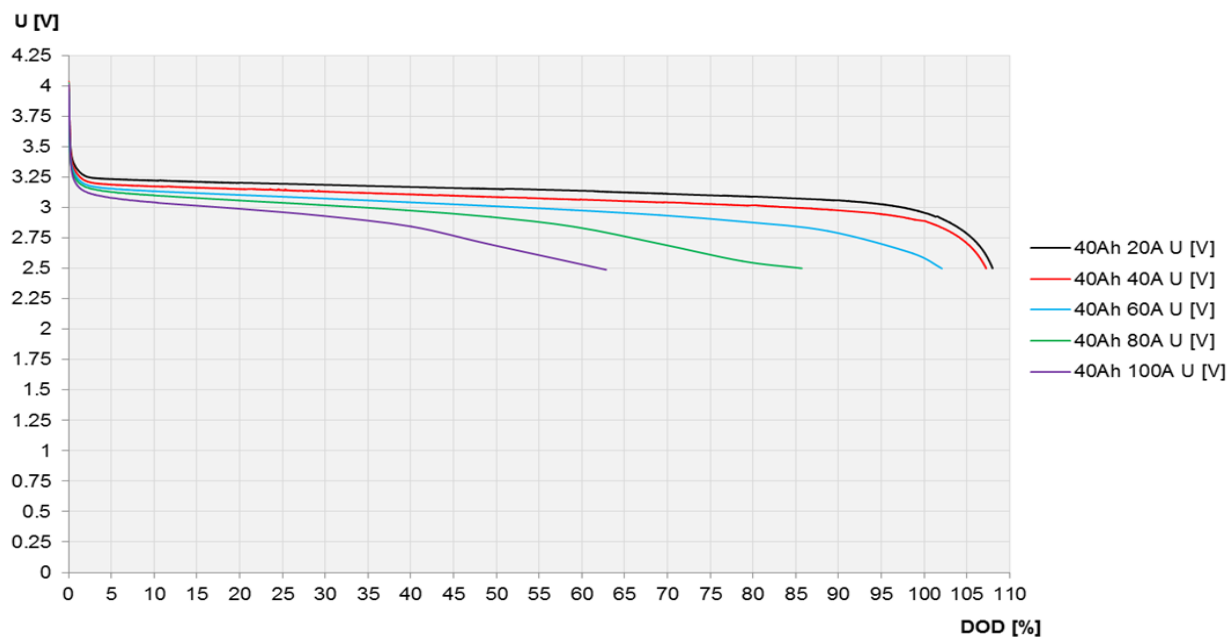


Jmenovitá kapacita článku udaná v katalogovém listu:

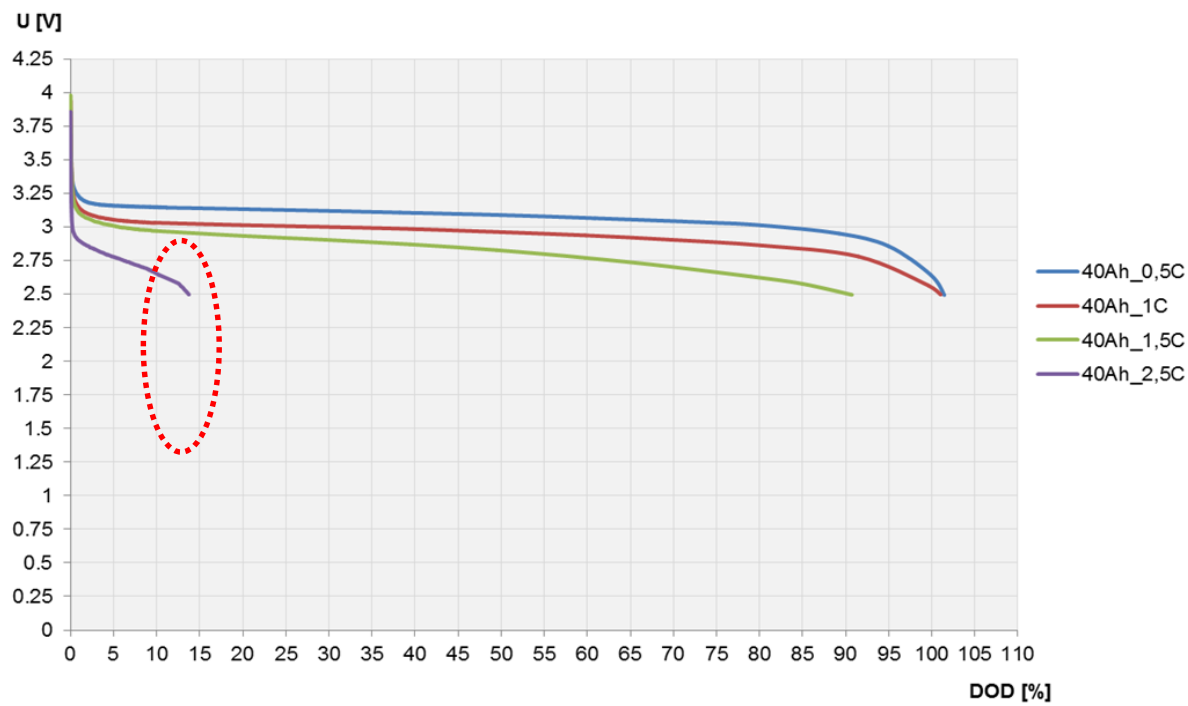
- Byla vyhodnocena na základě definovaných podmínek dle konkrétní normy (Olověné články ČSN EN 61056-1 ed. 2 , ČSN EN 61056-2 ed. 2), (Li-ion články ČSN EN 62660-1), ostatní dle příslušných ČSN
- Byla stanovena na základě jiných konkrétních podmínek – nutno specifikovat v katalogovém listě
- Byla stanovena na základě jiných konkrétních podmínek – bez jejich uvedení – **častý případ u Li-ion článků. Výrobci si stanovují své podmínky měření (vybíjecí proudy, teplota..) a v katalogovém listu je neuvádějí. Nutnost experimentálního ověření.**



Li-ion
LiFePO4
40Ah
25°C



Li-ion
LiFePO4
40Ah
0°C



Energetická kapacita článku W [Wh]

Udává součin kapacity a jmenovitého napětí článku. V případě akumulátorové baterie je celková energetická kapacita dána součtem všech dílčích článků.

$$W = C \cdot U$$

Vnitřní odpor R_i [Ω]

Každý článek obsahuje kromě zdroje napětí i tzv. vnitřní odpor. Vnitřní odpor ovlivňuje vodivost terminálů článku, vnitřních propojů a elektrod (tenké deskové vodiče).

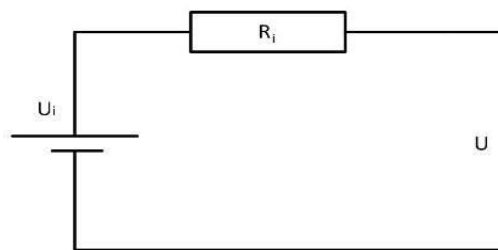
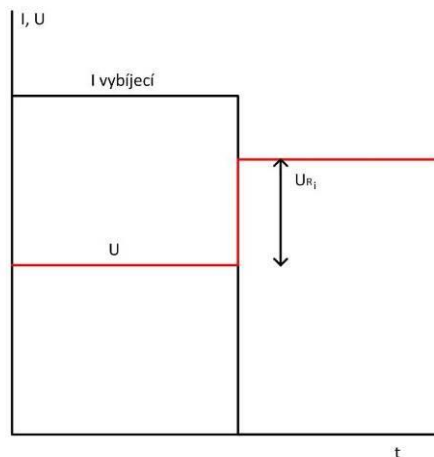
Trakční akumulátory – běžně jednotky až desetiny m Ω



Vnitřní odpor způsobuje:

- Energetické ztráty $P_{Ri} = R_i \cdot I^2$
- Zvýšení teploty článku během provozu
- Závislost svorkového napětí na vybíjecím proudu

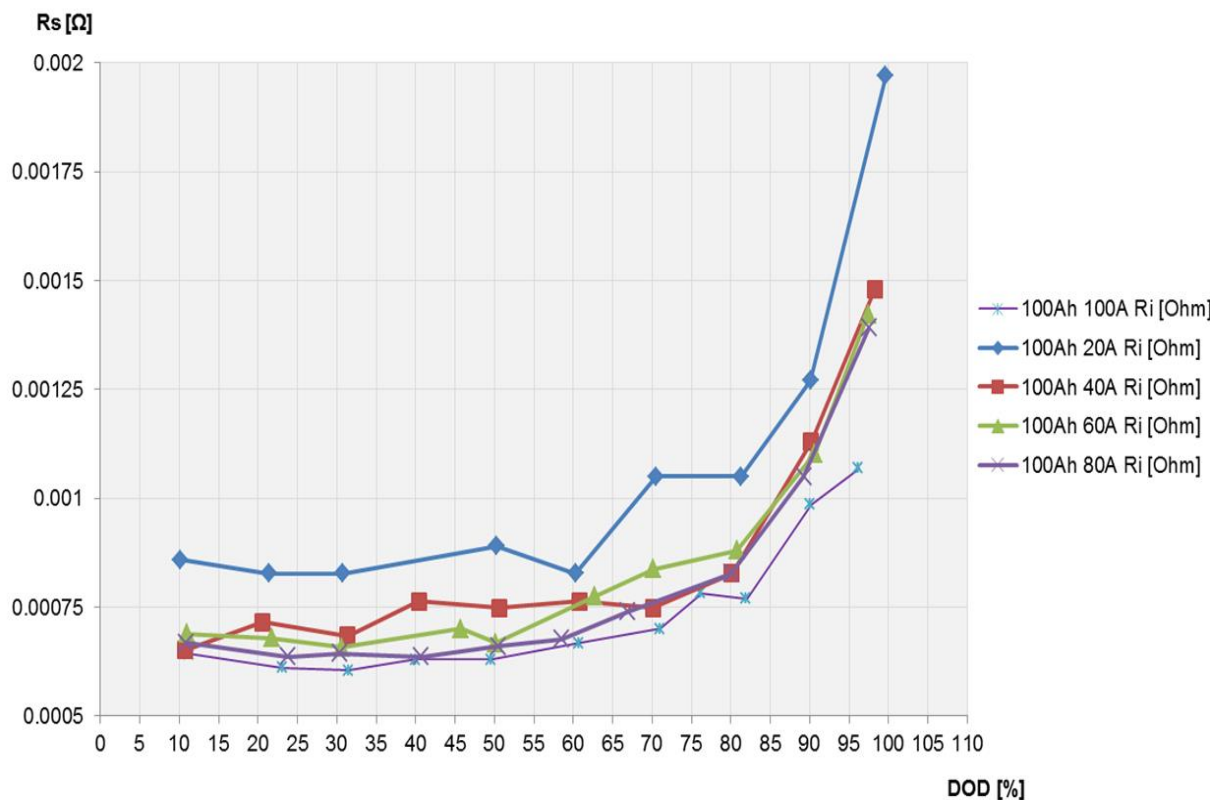
$$U_{\text{svorkové}} = U_i - R_i \cdot I$$



Vnitřní odpor se ve většině případů uvažuje jako konstanta.

Pro méně náročné stacionární aplikace **ANO**

Pro aplikace, kde se mění teplota okolí **NE**



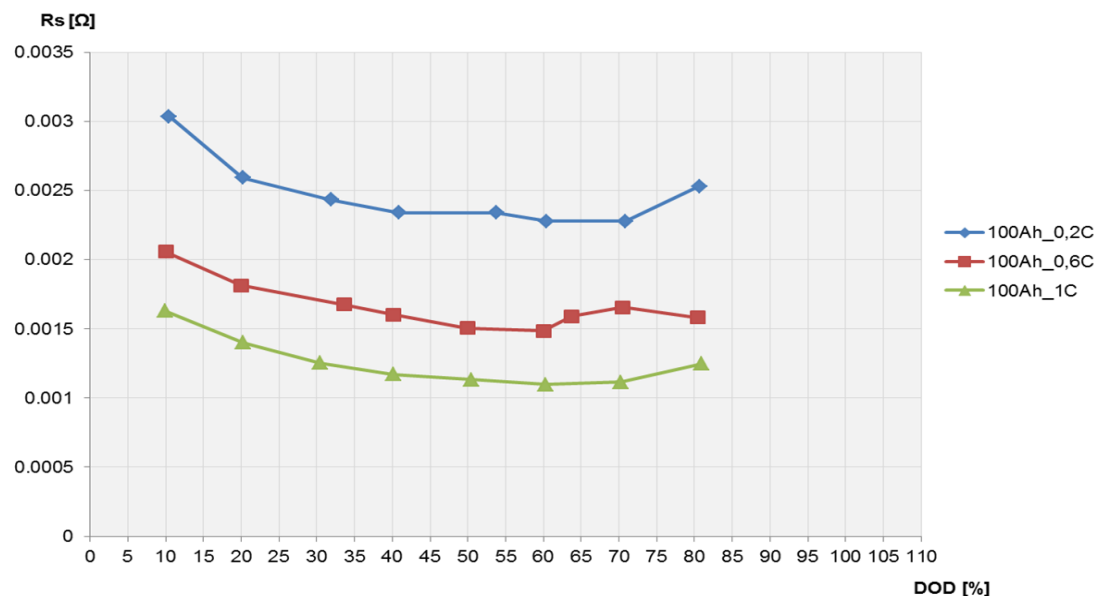
Závislost vnitřního odporu článku LiFePO4 100Ah na hloubce vybití 25 °C



Vliv teploty a hloubky vybití je z předchozího grafu zřejmý:

- Čím nižší teplota článku, tím vyšší vnitřní odpor
- Čím vyšší hloubka vybití, tím vyšší vnitřní odpor

Proč ale vnitřní odpor při teplotě 0°C klesá a pak roste?



Trvalý vybíjecí proud $I_{\text{trvalý}}$ [A]

Jedná se o proud, který je možno ze svorek článku odebírat po neomezeně dlouhou dobu až do úplného vybití. Jeho hodnota se udává v násobcích číselné hodnoty kapacity článku v Ah a označuje se jako „C“. Například pro článek 100Ah představuje proud 50A hodnotu 0,5C.

Velikost přesné hodnoty je dáno oteplením článku tak, aby nedošlo k jeho přehřátí. Výrobce musí tedy stanovit podmínky, za kterých je možno tento proud odebírat.

Je vhodné navrhovat akumulátorový systém z hlediska proudových odběrů na hranici možností?



Krátkodobý vybíjecí proud $I_{\text{krátkodobý}}$ [A]

Jedná se o proud, který je možno ze svorek článku odebírat pouze po definované dobu. **V katalogovém listě článku by měly být specifikovány podmínky!** To znamená:

- Jak velký proud lze ze svorek odebírat
- Jak dlouho lze proud odebírat
- Jak dlouho je nutno počkat pro další proudový odběr

Výše uvedené parametry závisí na konstrukci článku

– jeho tepelná kapacita a plocha pro chlazení.



LiFePO4 100Ah – žebrované tělo



Pracovní teplota článku [°C]

Pracovní teplota ovlivňuje:

- Životnost
- Vnitřní odpor
- Kapacitu
- Samovybíjení – skladování

Každý z článků má svá specifika nabíjení a vybíjení za různých teplot.

Typické rozdíly Pb x Li-ion

Ideální pracovní teplota většiny článků od 20-30°C

Jak je důležité temperování a klimatizování akupacku?



Stav nabití, hloubka vybití [%]

Veličiny charakterizující velikost energie v článku.

- **Stav nabití (SOC – state of charge)** určuje zbytkovou energii článku v %. Platí, že 100% SOC = plně **nabitý** článek.
- **Hloubka vybití (DOD – depth of discharge)** určuje odebranou energii z článku v %. Platí, že 100% DOD = plně **vybitý** článek.

Literatura a katalogové listy využívají obě dvě zkratky.

$$SOC = 100 - DOD$$



Životnost [počet cyklů]

Životnost udávaná v počtech cyklů za přesně definovaných podmínek (vybíjecí proud, teplota, stáří). Ve většině případů se uvažuje jeden nabíjecí cyklus jako vybití článku do 80% DOD a nabití do 0% DOD. Během tohoto cyklu dojde k nepatrnému opotřebení článku – snížení kapacity a zvýšení R_i .

Co přesně říká uživateli číslo v katalogovém listu označené jako životnost?

Po uskutečnění daného počtu cyklů (dle definovaných podmínek) dojde k poklesu kapacity na 80% původní jmenovité hodnoty – po dosažení uvedené životnosti článku nedojde ke znehodnocení, článek lze provozovat dál se sníženou kapacitou.

Jak rychle bude klesat kapacita po dosažení životnosti?

Životnost lze pozitivně ovlivnit sníženou hloubkou vybíjení.



Trvalý vybíjecí výkon $P_{\text{trvalý}}$ [W]

Výkon, který lze ze svorek článku odebírat dlouhodobě. Jeho hodnota vychází z hodnoty trvalého vybíjecího proudu.

$$P = I_{\text{trvalý}} \cdot U_{\text{jmenovité}}$$

Krátkodobý vybíjecí výkon $P_{\text{krátkodobý}}$ [W]

Výkon, který lze ze svorek článku odebírat krátkodobě. Jeho hodnota vychází z hodnoty krátkodobého vybíjecího proudu.

$$P = I_{\text{krátkodobý}} \cdot U_{\text{jmenovité}}$$



Objemová hustota energie W_v [Wh/l]

Udává velikost energie na objemovou jednotku článku. Jedná se o důležitý parametr. Typicky v rozmezí 100-300Wh/dm³

$$W_v = \frac{W}{V}$$

Hmotnostní hustota energie W_m [Wh/kg]

Udává velikost energie na hmotnostní jednotku článku. Jedná se o důležitý parametr. Nejlepší články dosahují hodnoty i více než 200Wh/kg

$$W_m = \frac{W}{m}$$



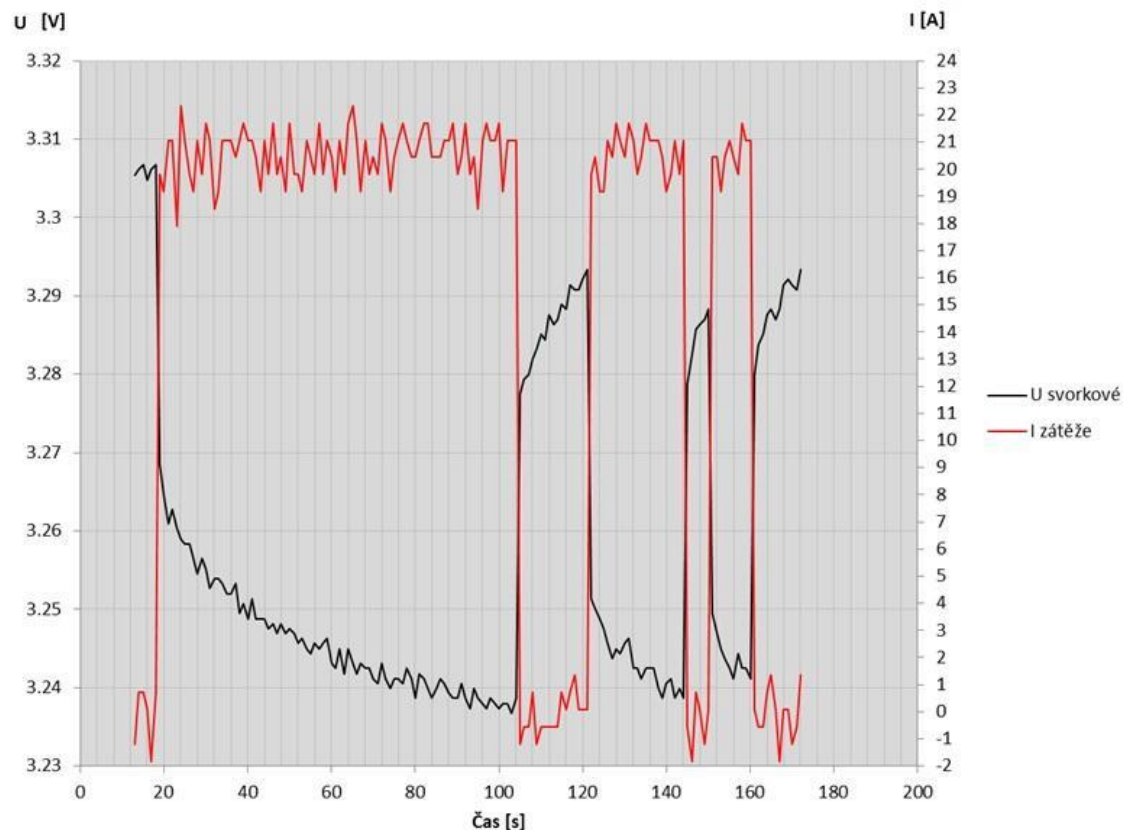
Obvodové modely článků

V případě simulace chování akumulátorového systému je nutno definovat obvodový model konkrétního článku. Obecně lze říci, že složitější model článku poskytuje přesnější výsledky, ale o to složitější parametrování. Výběr vhodného modelu by měl zohlednit KOMPROMIS mezi složitostí parametrizace a výslednou přesností.

Každý obvodový model se bude k reálnému článku pouze přibližovat. Nelze s absolutní přesností určit vliv stárí a např. výrobních tolerancí – každý článek je jiný.



**Jak se chová reálný článek v aplikaci?
Proč po neúspěšném startu automobilu čekáte
určitý čas a pak až jdete zkusit startovat ?**



R_i model článku

Nejjednodušší model článku. Uvažuje pouze zdroj elektrického napětí a vnitřní odpor. Při proudovém odběru poklesne svorkové napětí o úbytek na vnitřním odporu.

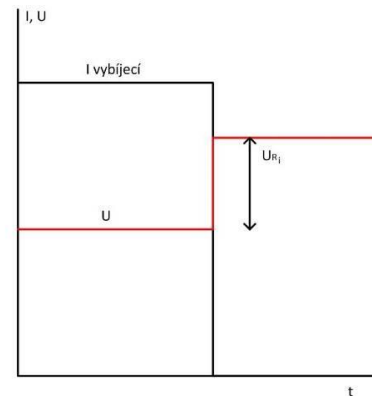
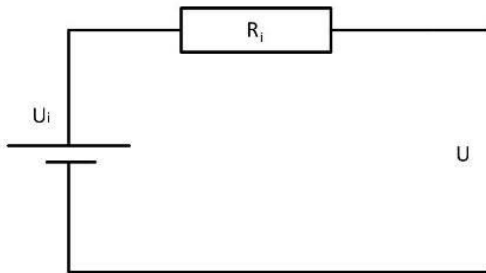
$$U_i = U_{i0} - A \cdot DOD$$

$$R_i = R_{i0} - B \cdot DOD$$

$$U = U_i - R_i \cdot I$$

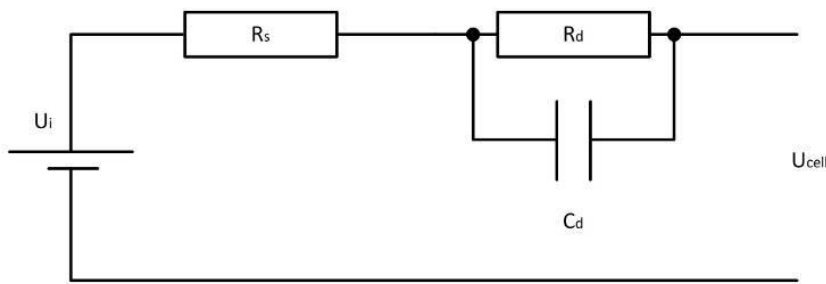
Vnitřní odpor a svorkové napětí je závislé na DOD. Konstanty A a B je nutno zjistit z laboratorního měření.

R_i model článku je vhodný pro nejméně náročné aplikace – neuvažuje dynamické jevy

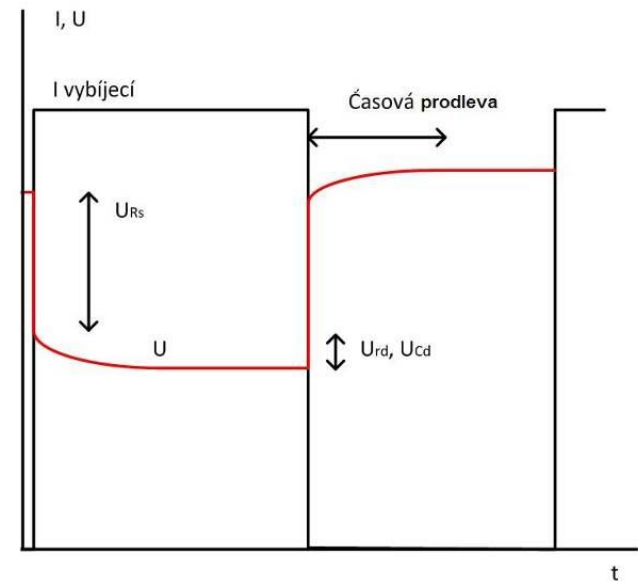


Theveninův model článku

Jedná se o model, jež zohledňuje dynamické chování článku. Skládá se ze zdroje napětí, sériového vnitřního odporu a RC článku, jenž simuluje polarizaci článku.



V bezproudém stavu je na svorkách článku měřitelné vnitřní napětí U_i . V případě proudového odběru se okamžitě svorkové napětí sníží o úbytek na R_s a současně se začne nabíjet C_d . Doba nabíjení je závislá na RC konstantě τ .

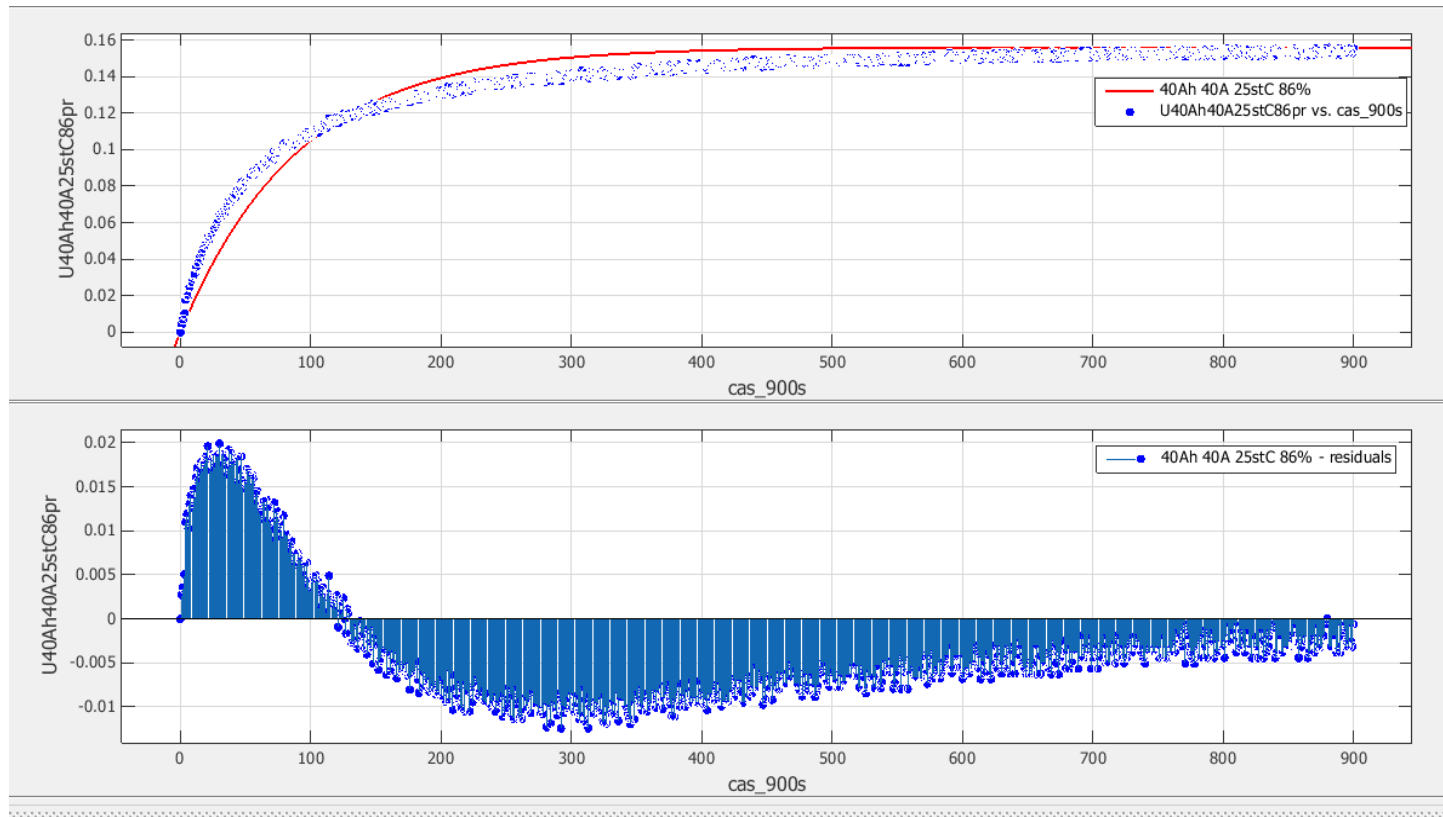


$$\tau = R_d \cdot C_d$$

Předpoklad – dynamická odezva U - exponenciála



Reálně naměřená dynamická odezva napětí



Reálný průběh se exponenciálnímu průběhu podobá, ale odchylky naznačují neshodu.

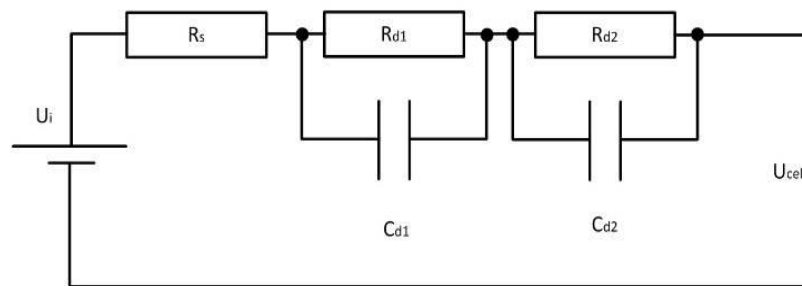
Modrý průběh – reálně naměřená odezva

Červený průběh – aproximace exponenciálou



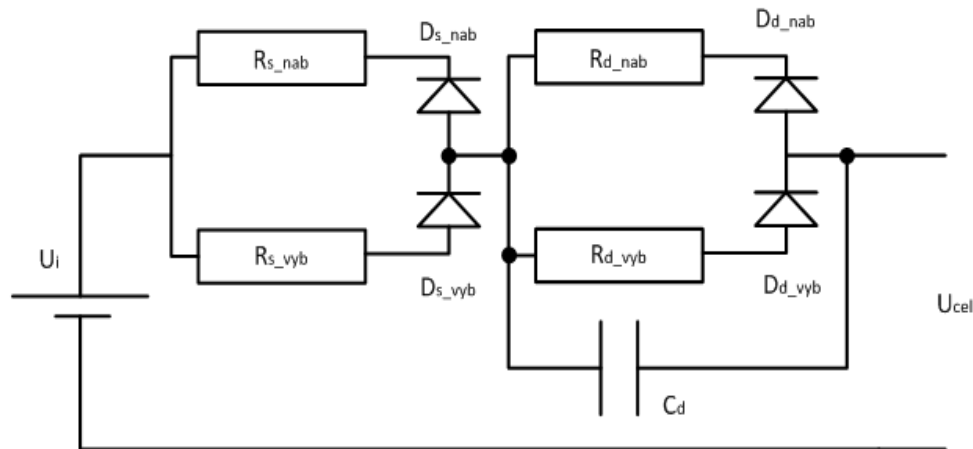
Theveninův DP model

Theveninův DP model odstraňuje nedostatky základního Theveninova modelu – přesnější přiblížení reálné odezvě díky využití většího počtu časových konstant – obrázek naznačuje dvě, reálně jich lze využít více. RC články simulují polarizaci tzv. vnější – koncentrační a polarizaci elektrochemickou.



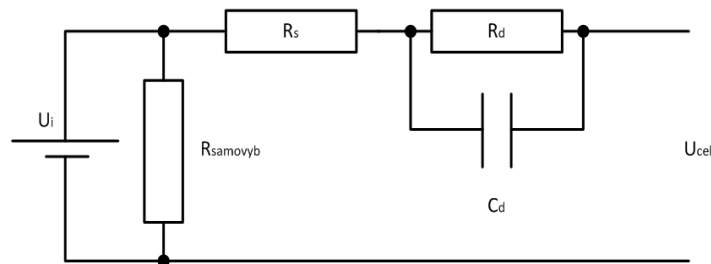
Modifikovaný Theveninův model

Základ tvoří jednoduchý Theveninův model. Modifikace spočívá v uvažování jiných parametrů modelu při vybíjení a při nabíjení.



Zohlednění samovybíjení

Zohlednění samovybíjení je důležité např. u článků NiCd, které trpí značným samovybíjením. Li-ion články samovybíjením prakticky netrpí. Pb články dle jejich kondice a čistoty elektrolytu.



Co všechno lze uvažovat jako samovybíjení?

Jedná se mimo jiné o všechny klidové spotřeby aplikace v době nečinnosti – typicky svody součástek připojených nadřazených systémů, stand-by režimy MCU apod. Při znalosti hodnot těchto klidových proudů lze samovybíjení začlenit do simulačního modelu.



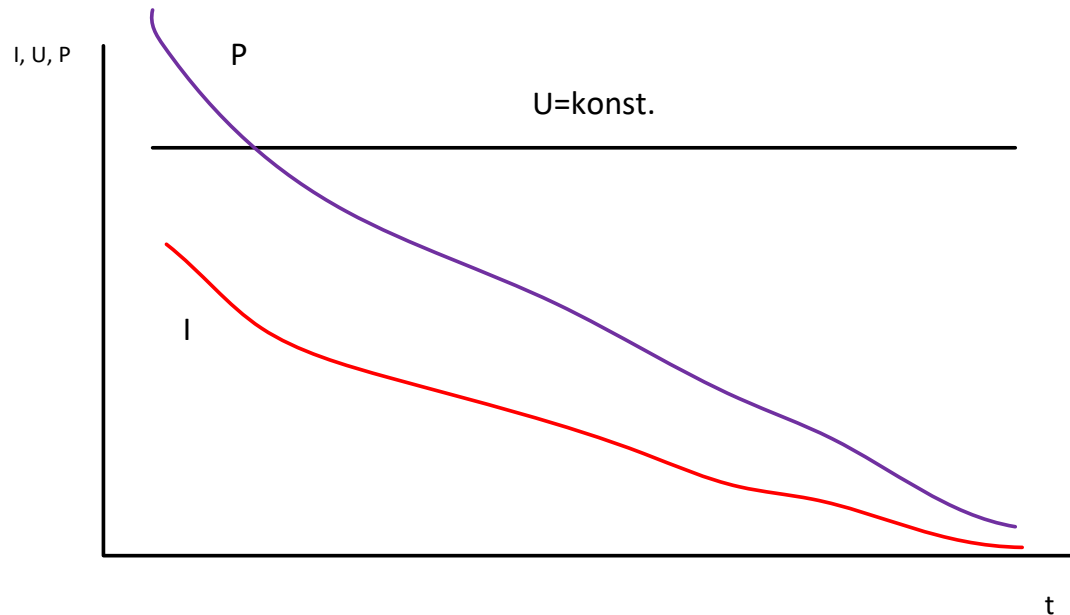
Přehled nabíjecích charakteristik

Každá technologie článků má svá konkrétní specifika jak pro případ **vybíjecího** režimu, tak pro případ **nabíjecího** režimu (napětový rozsah, teploty, proudy, apod.). Konkrétní specifikace bude probrána u každého článku, přičemž přehled nabíjecích charakteristik slouží k obecnému popisu. Volba vhodné charakteristiky může významným dílem prodloužit životnost článku. V případě nevhodné volby může dojít i po jednom nabití k celkovému znehodnocení článku.



Nabíjecí charakteristika typu U

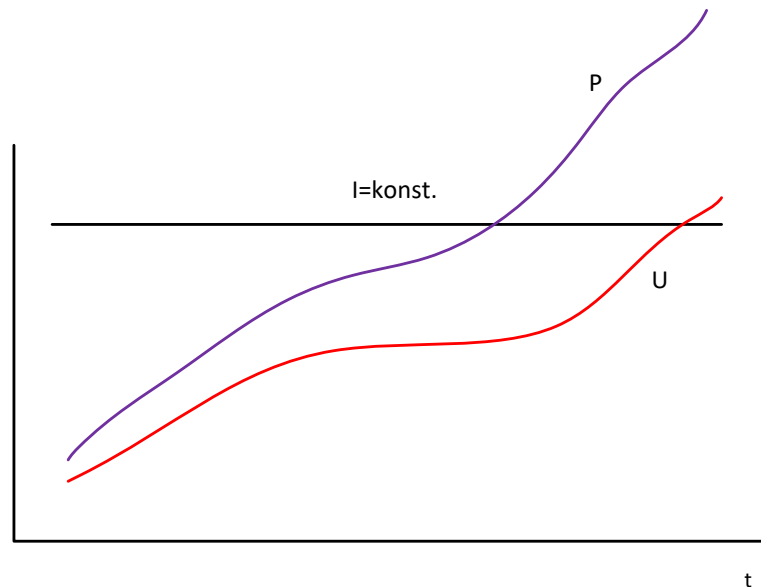
– tzv. *konstantní napětí*



Na nabíjený článek je připojeno tvrdé napětí. Obvodem prochází značný nabíjecí proud, který postupně klesá (tvar křivky proudového poklesu je dán technologií článku). Vhodné pro rychlonabíjení. **Nabíjecí proud nelze omezit.**



Nabíjecí charakteristika typu I – *tzv. konstantní proud*



Na nabíjený článek je připojen na proudový zdroj. Zdroj zabezpečuje dodávku konstantního proudu a napětí na článku roste. Problém – určení konce nabití.



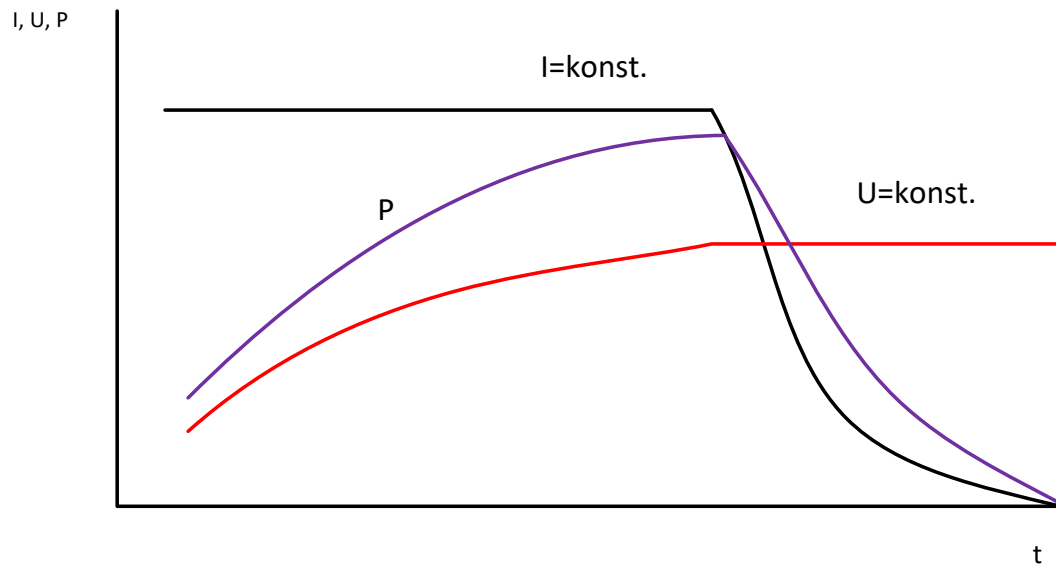
Nabíjecí charakteristika typu W

Nabíjený člunek je připojen na měkký napět'ový zdroj (transformátor s usměrňovačem, často doplněn o rezistor). V průběhu nabíjení se mění jak hodnota nabíjecího proudu, tak napětí nabíječe. Napětí roste a proud klesá. Nutno určit konec nabíjení.

Většinou nejlevnější řešení nabíječe.



Nabíjecí charakteristika typu IU – *tzv. konstantní proud, konstantní napětí*



Na nabíjený článek je v první fázi nabíjen konstantním proudem. Po dosažení maximálního napětí článku přejde nabíječ do režimu konstantního napětí, kdy dochází k finálnímu dobití.



Děkuji za pozornost!



Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



NÁRODNÍ
PLÁN OBNOVY



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU

Kurz celoživotního vzdělávání

Elektrotechnické systémy pro environmentálně příznivou dopravu

Předmět

Udržitelné energetické systémy pro dopravu

Studijní materiál

Akumulátory energie – vybrané technologie a jejich vlastnosti

Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.

Ing. Petr Sýkora



Požadavky kladené na trakční akumulátor

- **Akční rádius vozidla závisí na kapacitě**
- **Zatížitelnost (nabíjení / vybíjení) závisí na trvalých a špičkových proudech** (ve své podstatě na R_i a oteplení)
- **Životnost** - nutno počítat s opotřebením
- **Bezpečnost** – nehoda, vibrace, požár, zkrat, zatopení vozidla, ...
- **Cena** – ovlivňuje ji skoro vše
- **Recyklovatelnost** – plasty, alkalické kovy, těžké kovy, kyselé roztoky, atd..
- **Údržba**

Nároky na trakční akumulátory nejsou stejné – Elektrokoloběžka vs. Elektrokolo vs.

Elektroskútr vs. Elektromobil vs. Bateriové trakční kolejové vozidlo



Současně nejvyužívanější typy trakčních článků

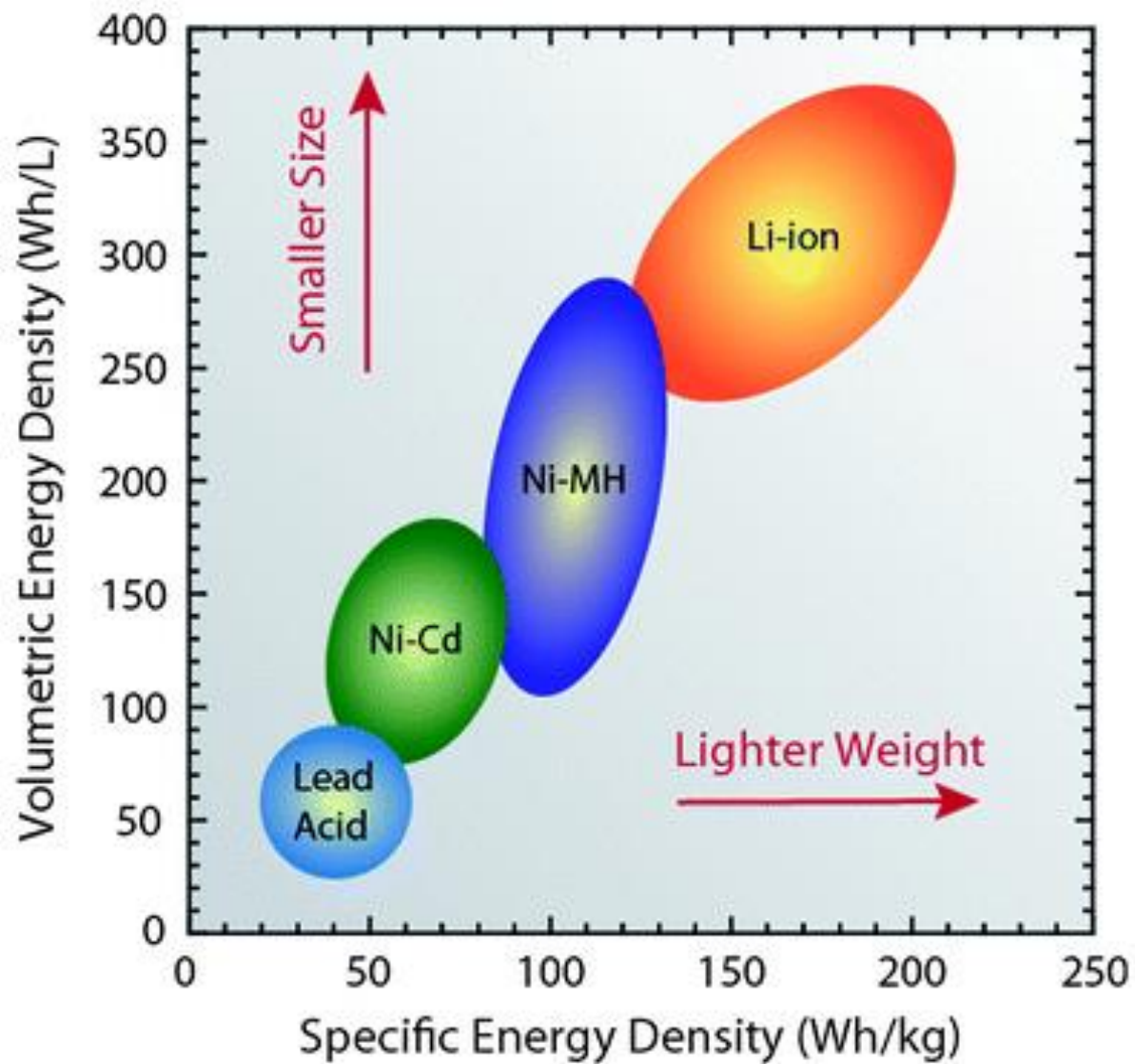
- **Olověné články (Lead acid battery)**

- Uzavřené články s víčky – klasická zaplavená koncepce
- Ventilem řízené články (VRLA – Valve Regulated Lead Acid)
- Hermeticky uzavřené články
- Články s tekutým elektrolytem
- Články s elektrolytem ve formě gelu
- Články s elektrolytem nasáklým do separátorů (AGM – Absorbent glass mat)
- EFB – enhanced flooded battery

- **Li-ion články (Lithium battery)**

- Li-ion - **tekutý** elektrolyt nasáklý do separátorů
- Li-pol – **tuhý (gelovitý)** elektrolyt
- Li-ion SSB – **solid state** – tuhý elektrolyt





Benzín: 2300Wh/kg

Nafta: až 3300Wh/kg



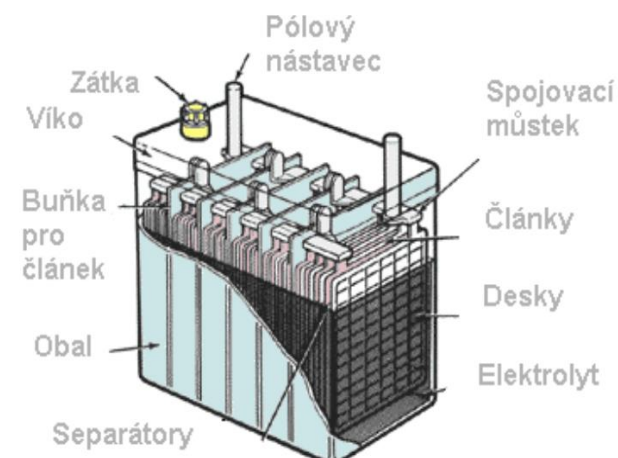
Olověné články

– Parametry typického olověného 12V akumulátoru (jinak 2V, 6V):

- Jmenovité napětí 12V (12,6V)
- Akumulátor složen z 6 elementárních článků o napětí 2V (1,75V-2,4V)
- Kapacita od jednotek po stovky Ah
- Životnost cca 500 nabíjecích cyklů
- Údržba v podobě kontroly hladiny elektrolytu
- Možnost rychlého nabíjení, ideálně však proudem o hodnotě 1/10 kapacity
- Při překročení napětí 2,4V/článek nastává tzv. **plynování** akumulátoru – chemická reakce produkující vodík – finální stupeň nabíjení
- Vybíjení je dovoleno do hladiny min. 1,75V/článek
- Vybitý akumulátor je nutno okamžitě dobít, jinak nastává trvalá degradace akumulčních schopností, tzv. **sulfatace**
- Ideální skladování – průběžné dobíjení či připojení na udržovací nabíječ (13,8V)

– Konstrukce klasického olověného 12V akumulátoru:

- Plastový kontejner s pólovými vývody a případnými dolévacími otvory
- Uvnitř články zapojeny **sériově**
- Článek tvořen systémem kladných (oxid olovičitý) a záporných elektrod (houbovitě olovo) – velká plocha – vysoká kapacita
- Desky ponořeny do elektrolytu – roztok H_2SO_4 a H_2O
- Hustota elektrolytu nabitého akumulátoru 1,27kg/l
- Vybíjení – aktivní hmota kladné a záporné elektrody na PbSO_4
- Nabíjení – síran zpět do elektrolytu



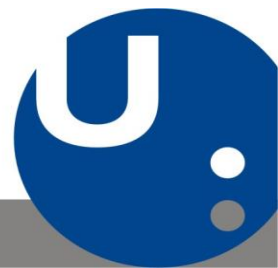
Pb akumulátory - porovnání

Označení	Energy Bull 96351	LFD 180	OTL220-12
Výrobce	Banner	Varta	Goowei
Typ	Zaplavený	Zaplavený	VRLA gelový
Kapacita [Ah]	180	180	200
Energie [Wh]	2160	2160	2400
Hmotnost [kg]	47	45	60,7
Objem [l]	25,2	25,5	30,7
Hmotnostní hustota energie [Wh/kg]	46	48	39,5
Objemová hustota energie [Wh/l]	86	85	78
Počet vybíjecích cyklů	300 (50% DOD ¹)	200 (50% DOD)	300 (80% DOD)

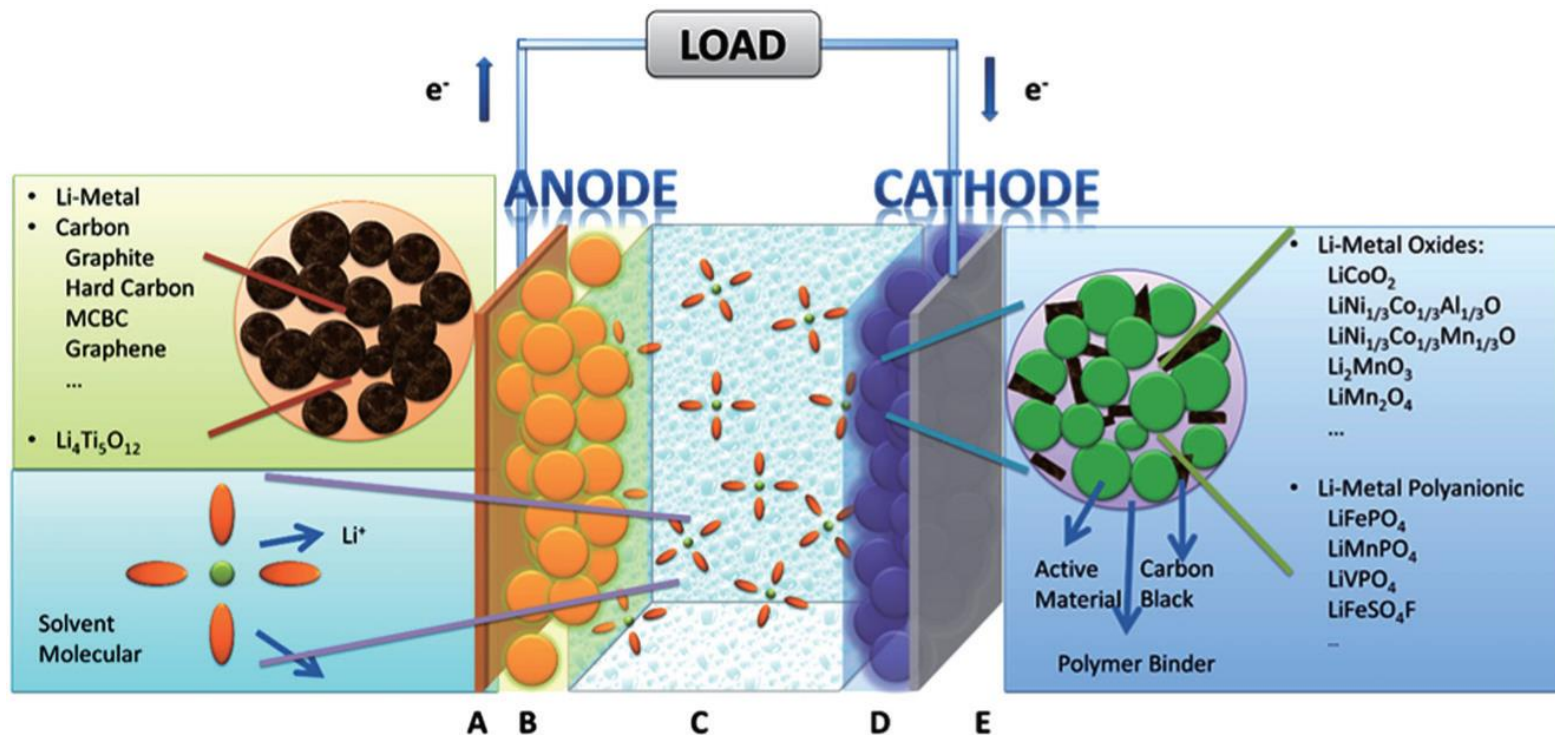


Lithiové články

- V současné době nejmodernější typ článku jak pro trakční účely, tak pro ostatní elektroniku
- Důvody:
 - Vysoká objemová a hmotnostní hustota energie
 - Netrpí paměťovým efektem – lze dobíjet a vybíjet v jakémkoli stavu DOD
 - Vysoké vybíjecí proudy – až 20C
 - Vysoké nabíjecí proudy
 - Možnost výroby od desetin Ah po stovky Ah
 - Vysoká životnost v počtech cyklů
 - Vhodná vybíjecí charakteristika
 - Vysoká hodnota jmenovitého napětí



Lithiové články - konstrukce



V případě článků (uvažujme vybíjení): katoda – kladná elektroda (+)

anoda – záporná elektroda (-)

- Tok elektronů od anody ke katodě

Elektrolyt – lithné soli nasáklé do separátorů



Lithiové články – obecné parametry a vlastnosti

- Vlastnosti článku závisí na materiálu kladné elektrody (výjimečně na materiálu záporné elektrody - LTO)
- Jmenovité U od 2,3V do 3,7V
- Maximální nabíjecí U 4,2V
- Pracovní teploty – nelze nabíjet pod 0°C
- Hmotnostní hustota energie od 100 až přibližně 250 Wh/kg
- Objemová hustota energie od 250 až přibližně 400Wh/l
- Podmínka bezpečného provozu a dlouhé životnosti:

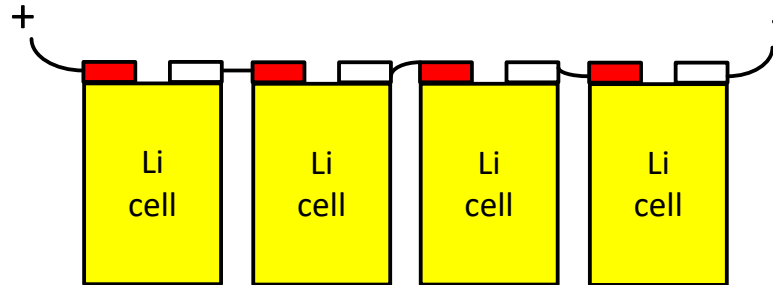
Za žádných okolností nesmí dojít k překročení napětí článku nad 4,2V !

Při překročení $U_{\max}$ již o setiny V dochází k enormnímu zahřívání.

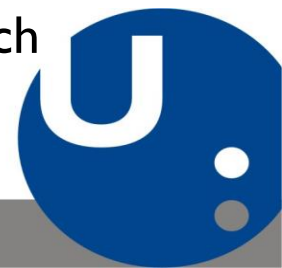
- I. fáze – snížení životnosti
- II. Fáze – exploze - videonahrávka



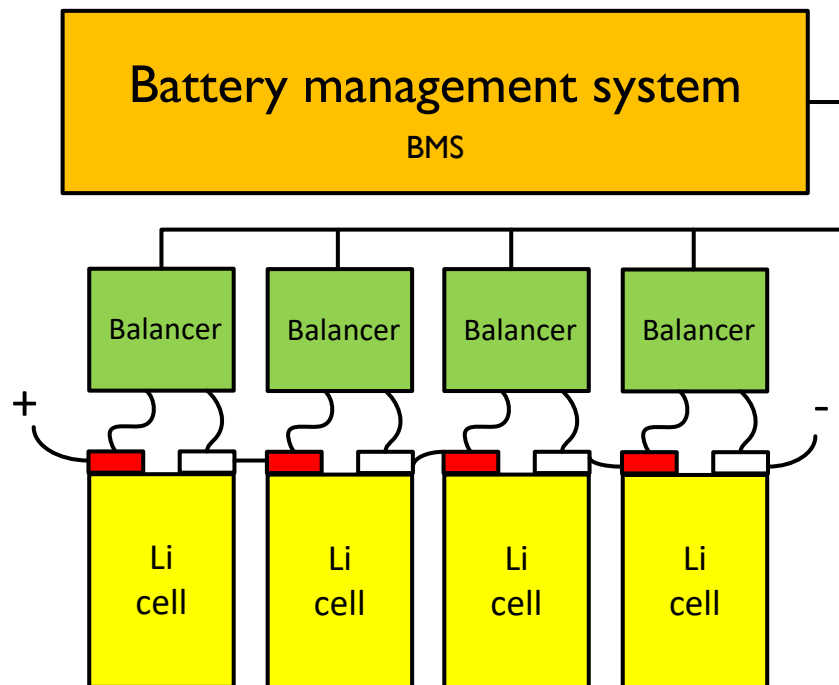
Kdy může dojít k přebití?



- Vždy v případě sériové kombinace článků
- Výrobní tolerance kapacit
- Nestejnoměrné stárí
- Vždy dochází k přebíjení jednoho z článků
- Li-ion vs. Pb
- Je možno se setkat s Li-ion akupackem, který je sestaven z identických článků?



Nadřazený bateriový systém, tzv. Battery Management System (BMS)

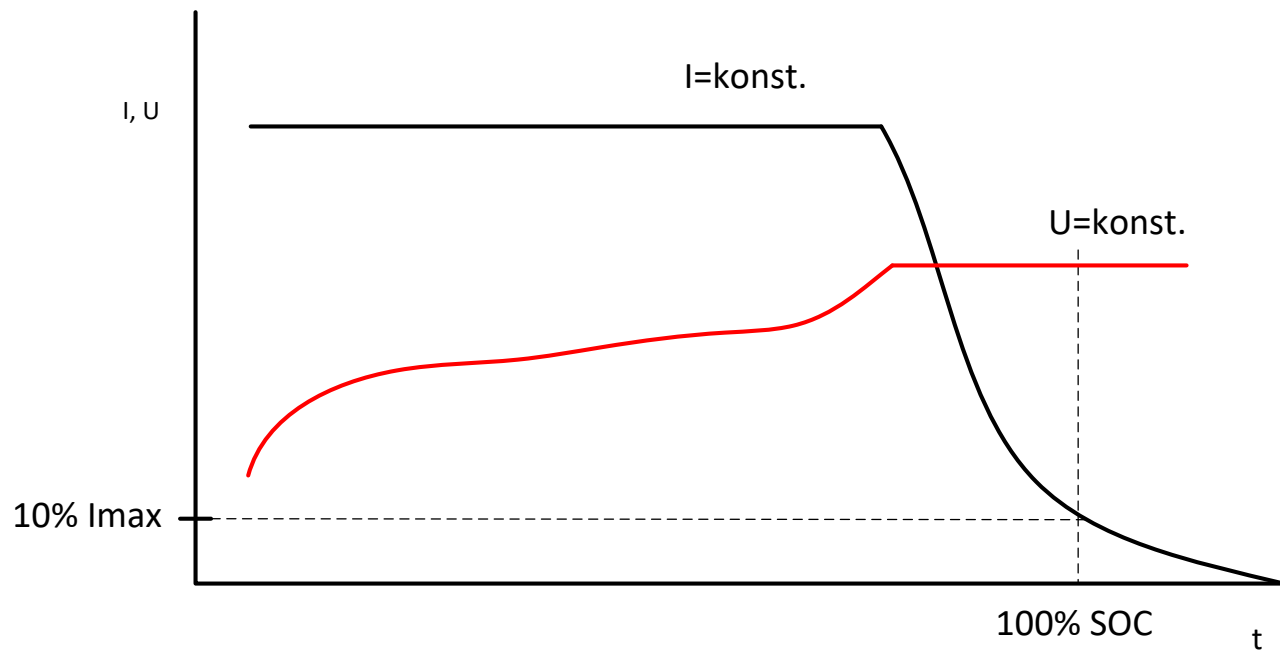


- Nutno hlídat napětí a teploty všech článků
- Nutno zasáhnout do nabíjecího procesu - tzv. balancování
- Monitoring vybíjení – v případě nadměrného vybití trvalá degradace kapacity článku

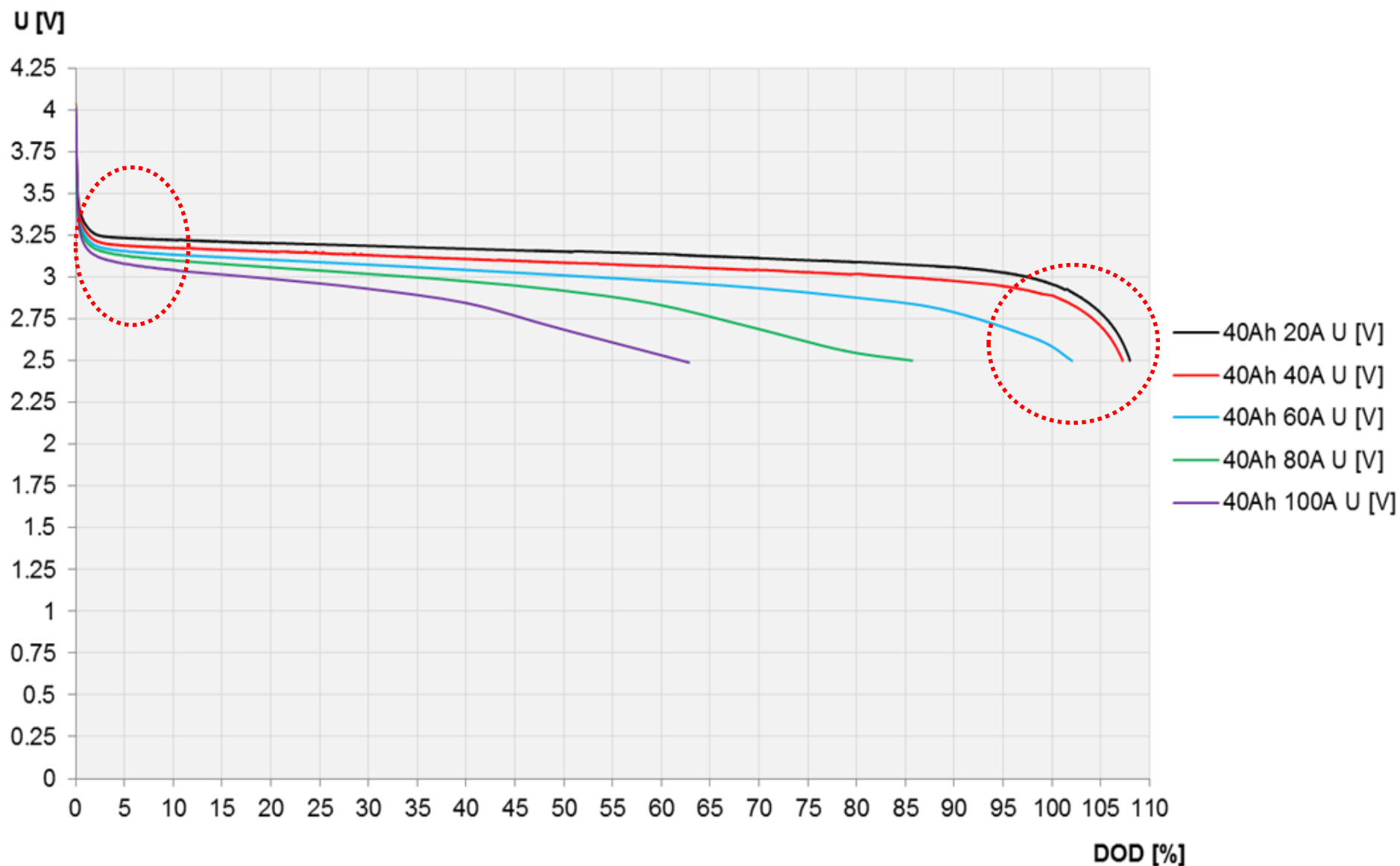


Nabíjecí proces Li-ion, Li-pol článků

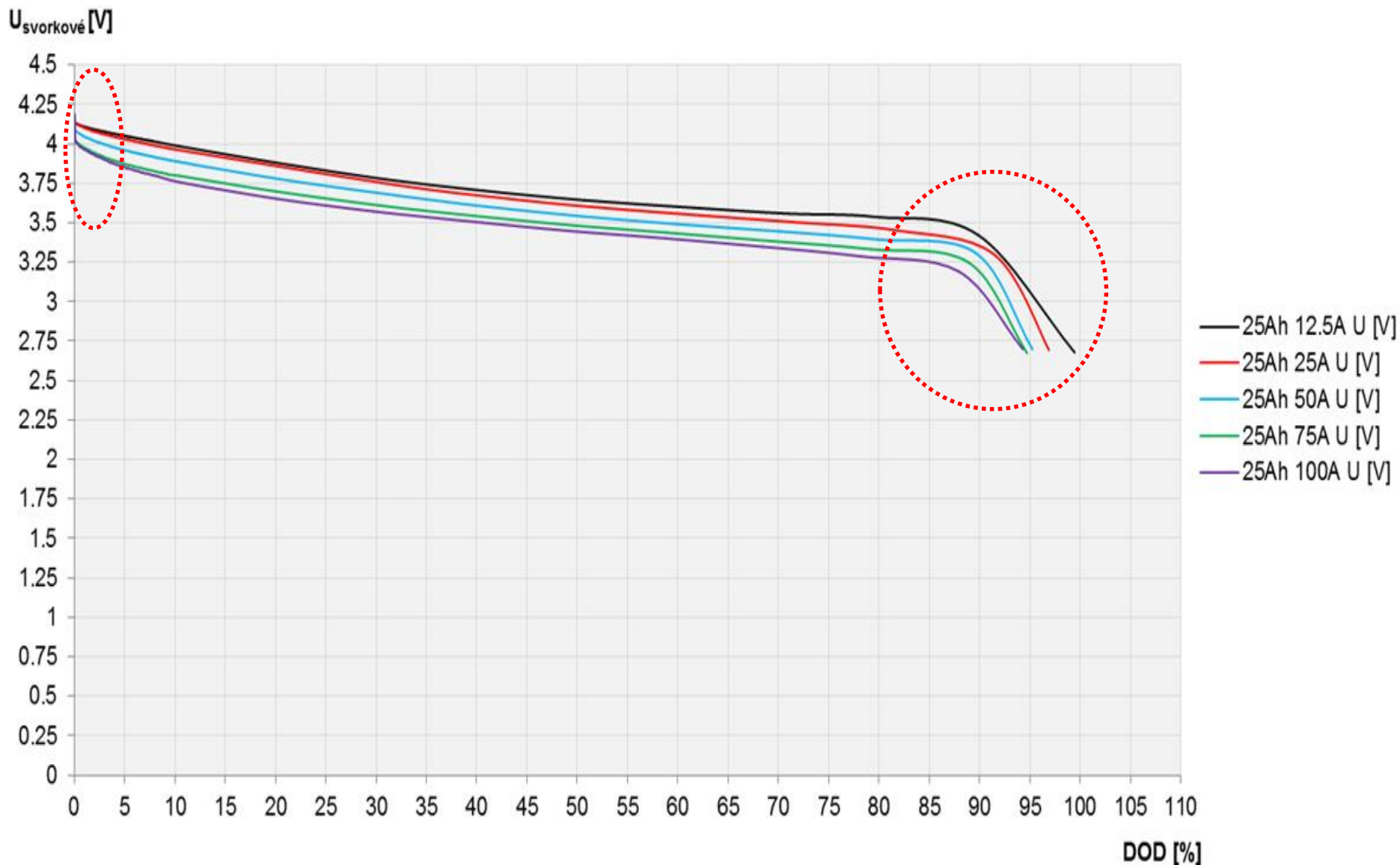
- Využití výhradně charakteristiky IU – napět'ový zdroj s proudovým omezením
- Nastavení max U hranice na 4,2V



Vybíjecí charakteristika Li-ion LiFePO₄ článku 40Ah



Vybíjecí charakteristika Li-pol SLPB článku 25Ah



Konstrukční provedení Li-ion, Li-pol článků

- Rozdělení dle pouzdra:

- Válcové (cylindrical cell)
- Krabicové, hranolové (prismatic cell)
- Pytlíkové (Pouch cell)

- Rozdělení dle vývodů:

- Šroubové
- Pasovinové
- Ploché kontakty



Čím větší plocha povrchu, tím lepší chlazení



Cylindrické články - rozdělení

Nomenclature	Dimensions	Remarks
F Cell	33 X 91 mm	Only used for Nickel Cadmium batteries.
E Cell	N/A	Discontinued in 1980.
D Cell	34.2 X 61.5 mm	Used in radios and flashlights.
C Cell	25.5 X 50 mm	Smaller form factor
Sub-C	22.2 X 42.9 mm	Mostly used for Ni-Cd batteries in cordless tools.
B Cell	20.1 X 56.8 mm	Discontinued in 2001.
A Cell	17 X 50 mm	Available for Ni-Cd, NiMH and primary lithium ion batteries.
AA Cell	14.5 X 50 mm	Introduced in 1907; included to ANSI standards in 1947; widely used in portable devices.
AAA Cell	10.5 X 44.5 mm	Developed as camera batteries; included to ANSI standards in 1959.
AAAA Cell	8.3 X 42.5 mm	Widely used as portable 9V batteries.
4.5V Battery	67 X 62 X 22 mm	3-Cell battery pack widely used in Europe and Russia.
9V Battery	48.5 X 26.5 X 17.5 mm	6-Cell battery pack developed for transistor radios.
18650	18 X 65 mm	Developed in 1990s for rechargeable Lithium-ion batteries; widely used in electric vehicles and laptops.
26650	26 X 65 mm	Used for large Lithium ion batteries used in automobiles and UPS.
14500	14 X 50 mm	Developed for AA size Li-ion batteries.
21700	21 X 70 mm	Developed in 2016 for use in Tesla Model 3 and other consumer applications.
32650	32 X 65 mm	Used for Lithium Iron Phosphate batteries



21700

Li-ion technologie LCO (Lithium kobalt oxid)

- Kladná elektroda sloučenina LiCoO_2
- C záporná elektroda
- Jmenovité U 3,6V (3-4,2V)
- Jedna z nejrozšířenějších technologií
- Mobilní telefony, kamery, notebooky, jednodušší spotřebiče, atd.
- Typické pouzdro 18650
- Vybíjecí proud max. 1C
- Články nejsou příliš vhodné pro trakční účely



Válcový článek Sanyo 2800mAh LCO



Li-ion LCO – typické vlastnosti

- *Výhody technologie LCO:*
 - *Vysoká hustota energie (150-200Wh/kg)*
 - *Vysoká hodnota jmenovitého napětí 3,6V*
- *Nevýhody technologie LCO:*
 - *Nízká výkonová hustota*
 - *Nízká bezpečnost*
 - *Nižší životnost (500-1000 cyklů)*
 - *Vysoká cena*
 - *Nižší vybíjecí proudy*



Li-ion technologie NMC (nikl mangan kobalt)

- Kladná elektroda sloučenina LiNiMnCoO_2
- C záporná elektroda
- Jmenovité napětí 3,6V (3-4,2V)
- Velice užívané
- Možné zákaznické modifikace pro:
 - Velká hustota energie a malé vybíjecí proudy
 - Malá hustota energie a vysoké vybíjecí proudy (až 5C)
- Typické pouzdro 18650
- Elektro skútry, aku nářadí, elektro kola, atd.



Válcový článek Panasonic NCR18650PF NMC



Li-ion NMC – typické vlastnosti

- *Výhody technologie NMC:*
 - *Vysoké hodnoty vybíjecích proudů*
 - *Dobrá bezpečnost*
 - *Dobrá životnost (1 000-2000 cyklů)*
 - *Vysoká hustota energie*
- *Nevýhody technologie NMC:*
 - *Vysoká cena*
 - *Nízké hodnoty nabíjecích proudů*

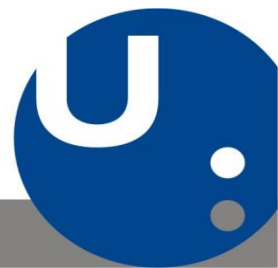


Li-ion technologie LMO (Lithium mangan oxid)

- Kladná elektroda sloučenina LiMn_2O_4
- C záporná elektroda
- Jmenovité napětí 3,7V (3-4,2V)
- Vhodné pro trakční účely
- Typické pouzdro 18650
- Vybíjecí proudy až 3C
- Elektromobily – Nisan Leaf, BMW i3
- Velice často technologie LMO v kombinaci s NMC (LMO – vyšší proudy, NMC – vysoká kapacita)



Elektromobil BMW i3



Li-ion LMO – typické vlastnosti

Výhody technologie LMO:

- *Vysoké hodnoty nabíjecích proudů*
- *Vysoké hodnoty vybíjecích proudů*
- *Přijatelná cena*
- *Dobrá bezpečnost*

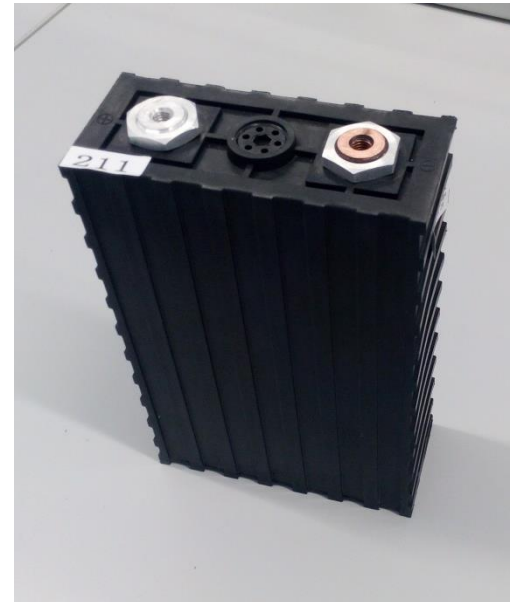
Nevýhody technologie LMO:

- *Nízká životnost (až 700 cyklů)*
- *Nižší hustota energie (100-150Wh/kg)*

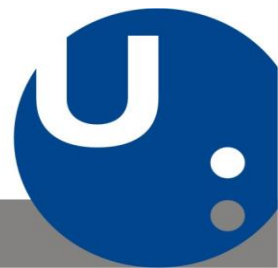


Li-ion technologie LFP (Lithium železo fosfát)

- Kladná elektroda sloučenina LiFePO_4
- C záporná elektroda
- Jmenovité napětí 3,2V (2,5-3,7V)
- Vhodné pro trakční účely – široké využití
- Významná přednost – bezpečnost
- Při přebití by neměly vzplát
- Vybíjecí proudy až 3C
- Elektrobusy, elektroskútry, elektrokola, atd.



Sinopoly SP-LFP100Ah



Li-ion LFP – typické vlastnosti

Výhody technologie LFP:

- *Vysoké hodnoty nabíjecích proudů*
- *Vysoké hodnoty vybíjecích proudů*
- *Přijatelná cena*
- *Vysoký stupeň bezpečnosti*
- *Vysoká životnost*

Nevýhody technologie LFP:

- *Nízká objemová a hmotnostní hustota energie*

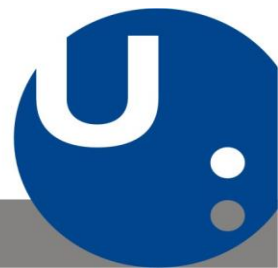


Li-ion technologie NCA (nikl kobalt hliník)

- Kladná elektroda sloučenina LiNiCoAlO_2
- C záporná elektroda
- Jmenovité napětí 3,6V (3-4,2V)
- Vhodné pro trakční účely – především automotive
- Vhodné pro uložení energie - statické systémy
- Technologii využívá Tesla Motors



Tesla model S



Li-ion NCA – typické vlastnosti

Výhody technologie NCA:

- *Vysoké hodnoty nabíjecích proudů*
- *Vysoké hodnoty vybíjecích proudů*
- *Vysoká hustota energie (200-260Wh/kg)*

Nevýhody technologie NCA:

- *Nízká bezpečnost*
- *Vysoká cena*
- *Nízká životnost (500 cyklů) – závisí na okolnostech*



Li-ion technologie LTO (Lithium titan oxid)

- **Záporná** elektroda sloučenina LiNiCoAlO_2
- C kladná elektroda
- Změna struktury – výrazná změna vlastností
- Jmenovité U – 2,4V (1,8-2,85V)
- **Vyvinuté pro trakční účely – lze nabíjet pod 0°C !!!**
- **Automotive**



Toshoba SCiB článěk LTO



Li-ion LTO – typické vlastnosti

Výhody technologie LTO:

- *Vysoké hodnoty nabíjecích proudů*
- *Vysoké hodnoty vybíjecích proudů*
- *Vysoká životnost*
- *Vysoká bezpečnost*

Nevýhody technologie LTO:

- *Nízká objemová a hmotnostní hustota energie*
- *Vysoká cena*



Li-pol SLPB (Superior lithium polymer battery)

- Tuhý elektrolyt, plochý tvar
- Typický výrobce Kokam
- Jmenovité napětí 3,6V (2,7-4,2V) dle technologie
- Obal článku pouze jednoduchý – nemůže vytéci elektrolyt
- Integrovaná pojistka ve vývodové svorce
- Technologie NMC
- Hybridní články – kombinace NMC, LFP, LTO
- Řady HE, HP, UHP
- Vybíjecí proudy až 20C
- Trakční účely



Kokam SLPB článek



Li-pol SLPB – typické vlastnosti

Výhody technologie SLPB:

- *Vysoké hodnoty vybíjecích proudů*
- *Vysoká hmotnostní hustota energie*
- *Vysoká objemová hustota energie*
- *Nízký vnitřní odpor*
- *Nejnáročnější aplikace*

Nevýhody technologie SLPB:

- *Nutnost ohřevu / chlazení článků během provozu*
- *Nižší hodnoty nabíjecích proudů*
- *Vysoká cena !*



Li články - porovnání

Označení	WB-LYP100Ah	VL41M	SCiB	SLPB120216216
Výrobce	Winston Battery	Saft	Toshiba	Kokam
Technologie	LFP	NCA	LTO	Li-pol
Kapacita [Ah]	100	41	20	53
Energie [Wh]	320	147	46	196,1
Jmenovité napětí [V]	3,2	3,6	2,3	3,7
Hmotnost [kg]	3,5	1,07	0,51	1,16
Objem [l]	2,42	0,51	0,26	0,6
Hmotnostní hustota energie [Wh/kg]	91	136	90	169
Objemová hustota energie [Wh/l]	132	285	177	326
Počet vybíjecích cyklů	>3000 (80% DOD)	>1400 (80%DOD)	4000 (100%DOD)	1200 (100%DOD, 1C)



Děkuji za pozornost!



Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



NÁRODNÍ
PLÁN OBNOVY



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU

Kurz celoživotního vzdělávání
**Elektrotechnické systémy
pro environmentálně příznivou
dopravu**

Předmět
**Udržitelné energetické systémy
pro dopravu**

Studijní materiál
**Nové technologie trakčního napájení
25 kV 50 Hz**

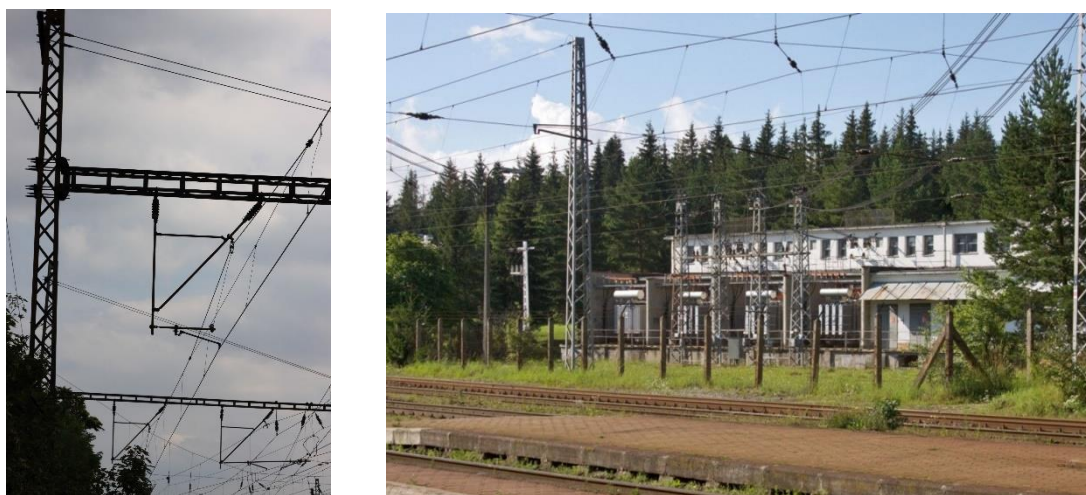
prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.
Ing. Ladislav Mlynařík, Ph.D.



1. Úvod

Rostoucí přetíženost silniční sítě, výrazné environmentální dopady silniční dopavy po stránce emisí, hluku a nároků na plochu, její neúměrná energetická náročnost, velká dopravní nehodovost a technologické limity tohoto segmentu dopavy vytvářejí potřebu hledání cest a prostředků, jak řešit dopravu osob i nákladu výrazně efektivněji, energeticky úsporněji a šetrněji vzhledem k životnímu prostředí. Zde má velký potenciál elektrická železnice, což je podpořeno i řadou koncepčních dokumentů EU a ČR v oblasti dopavy, energetiky a životního prostředí.

V důsledku modernizace železničních koridorů v ČR a dodávek nových nebo rekonstruovaných vozidel se rychle zvyšuje poptávka zejména po osobní železniční dopravě. Například mezi lety 2010 a 2019 vzrostl v ČR přepravní výkon osobní železniční dopavy z 6591 mil. osobokilometrů na 11069 mil. osobokilometrů (vnitrostátní přeprava), [7]. Podle stejného zdroje narostl ve stejném období přepravní výkon nákladní železniční dopavy z 13770 mil. tkm na 16070 tkm. V současnosti je však v ČR další nárůst objemů přeprav po železnici významně limitován kapacitou infrastruktury.



**Obr. 1 Drážní energetická infrastruktura
trakční vedení a napájecí stanice 3 kV DC**

Po stránce energetické, environmentální i ekonomické má železniční doprava rozhodující přínosy v elektrické trakci. Po ekonomické stránce lze tuto skutečnost dokreslit údajem z nákladní dopavy, kdy je v elektrické trakci realizováno v ČR přibližně 92% přeprav, avšak náklady na provoz 8% nákladních vlaků v dieselové trakci představují přibližně 30% nákladů celkových.

Železnice je po technické stránce tvořena souborem čtyř subsystémů:

- Vozidla
- Infrastruktura
- Zabezpečovací systémy
- Energetické napájení

Nutnou podmínkou potřebného zvýšení kapacity železniční infrastruktury jsou opatření právě v oblasti energetické drážní infrastruktury – obr. 1. Do budoucna lze očekávat posilování trendů růstu požadavků na drážní napájecí systémy, a to zejména v souvislosti s následujícími skutečnostmi:

- Růst intenzity provozu.
- Růst instalovaných výkonů hnacích vozidel v osobní i nákladní dopravě, v současnosti je typickou hodnotou výkonu moderního elektrického hnacího vozidla 6 MW.

- Růst rychlostí vlaků – v současnosti jezdí na modernizovaných koridorových tratích dálkové vlaky rychlostí 140 až 160 km/h, aktuálně modernizované úseky tratí na IV. koridoru jsou připravovány na rychlost 200 km/h, přičemž výkon potřebný na překonání odporu vzduchu roste s třetí mocninou rostoucí rychlosti.
- Zajištění dostatečné kvality napájení pro vozidla – spojitost napájení, minimalizace kolísání efektivní hodnoty trolejového napětí s vazbou na eliminaci výkonového omezení vozidel, zajištění podmínek pro neomezenou rekuperaci, minimalizace ztrát při přenosu energie do vozidla.
- Plnění požadavků kladených ze strany distributora elektrické energie, zejména symetrie odběrů energie z distribuční sítě, co nejmenší poměr mezi maximální a střední hodnotou odebíraného výkonu, eliminace odběru jalového výkonu, eliminace harmonického zkraslení proudů odebíraných z distribuční sítě.

Elektrifikace hlavních tratí byla na území ČR zahájena v 50. letech 20. století stejnosměrnou napájecí soustavou 3kV. Touto soustavou jsou v současnosti elektrifikovány tratě v severní části země, v podstatě jde o linii Chomutov – Ústí n. L. – Praha – Olomouc – Vsetín – celkem 1818 km tratí. V jižní části území ČR je pro elektrifikaci tratí použita jednofázová soustava 25 kV 50 Hz. Celkem je v ČR touto soustavou elektrifikováno 1381 km tratí.

Již v počátcích elektrifikace v 50. letech byl shledán jeden z významných nedostatků stejnosměrné soustavy 3 kV a to velká spotřeba mědi pro trakční a zesilovací vedení v důsledku průchodu velkých proudů zajišťujících dodávku potřebného výkonu pro hnací vozidla. Ztrátové výkony na trakční soustavě 3 kV stejnosměrných (ztráty v trakčním vedení při odběru, ztráty v trakčním vedení při rekuperaci a ztráty v brzdových odporcích neuskutečněnou rekuperací) dosahují až 30% výkonu odebraného pro pohon vozidel. Byly proto hledány jiné systémy pro trakční pohony hnacích vozidel, zajímavostí je, že nejen v oblasti elektrické trakce, ale například i pomocí turbínového pohonu lokomotiv s mechanickým přenosem výkonu. V době elektrifikace železničních tratí v ČR systémem 3kV disponovaly elektrické lokomotivy výkonem 2 MW, v současnosti je však standardem 6 MW. Přitom ztráty v trakčním vedení rotou druhou mocninou přenášeného výkonu.

Rozvojem výkonových polovodičů a dostupností výkonových diod s dostatečným napětovým a proudovým dimenzováním byly vytvořeny předpoklady pro efektivní realizaci lokomotiv pro napájecí jednofázovou soustavu 25 kV s průmyslovým kmitočtem 50 Hz. Trakční řetězec těchto lokomotiv sestával z odbočkového transformátoru, diodového usměrňovače a stejnosměrných trakčních motorů, řada lokomotiv této koncepce je stále v provozu.

Použití soustavy 25 kV 50 Hz umožnilo napájení vozidel nižšími proudy s výrazně vyšší účinností přenosu (ztráty v trakčním vedení jen 2 až 4%) a s nižší spotřebou mědi na vedení, zároveň se snížila potřeba výstavby napájecích stanic (3 kV stejnosměrné – trakční měnirny po přibližně 20 km, i méně, napájecí stanice 25 kV 50 Hz po 40 až 60 km). Díky vyššímu napětí a menším proudům vykazuje soustava 25 kV 50 Hz oproti stejnosměrné soustavě 3 kV vyšší přenosovou schopnost (rostoucí s druhou mocninou napětí) a vyšší tvrdost napětí trakční sítě. Kromě těchto zásadních přínosů se soustava 25 kV 50 Hz vyznačuje řadou dalších výhod jako je odbourání bludných zemních stejnosměrných proudů se všemi souvislostmi, snazší diagnostika vzdálených zkratů, potenciální zlepšení podmínek pro rekuperaci a možnost průběžného uzemňování kolejnic.

Uvedené přínosy napájecí soustavy 25 kV 50 Hz vůči stejnosměrné soustavě 3 kV vedly v roce 2016 k rozhodnutí Ministerstva dopravy ČR elektrifikovat do budoucna veškeré tratě v ČR pouze jednofázovou soustavou 25 kV 50 Hz a zároveň postupně rekonstruovat napájecí systém na stávajících tratích ze 3 kV stejnosměrných na 25 kV 50 Hz. Nejedná se o aktivity vzdálené budoucnosti, ale již v současnosti jsou rozpracovávány koncepce a etapy změny napájecího systému, některé investiční akce již směřují k realizaci.

Přechod na jednotnou drážní napájecí soustavu v ČR s sebou však přinese nejen opuštění systému 3 kV stejnosměrných, v širších souvislostech se ukazuje i nutnost nástupu nových technologií trakčního napájení 25 kV 50 Hz. Právě této problematice se věnuje předkládaný článek.

2. Technické řešení konvenční napájecí stanice 25 kV 50 Hz

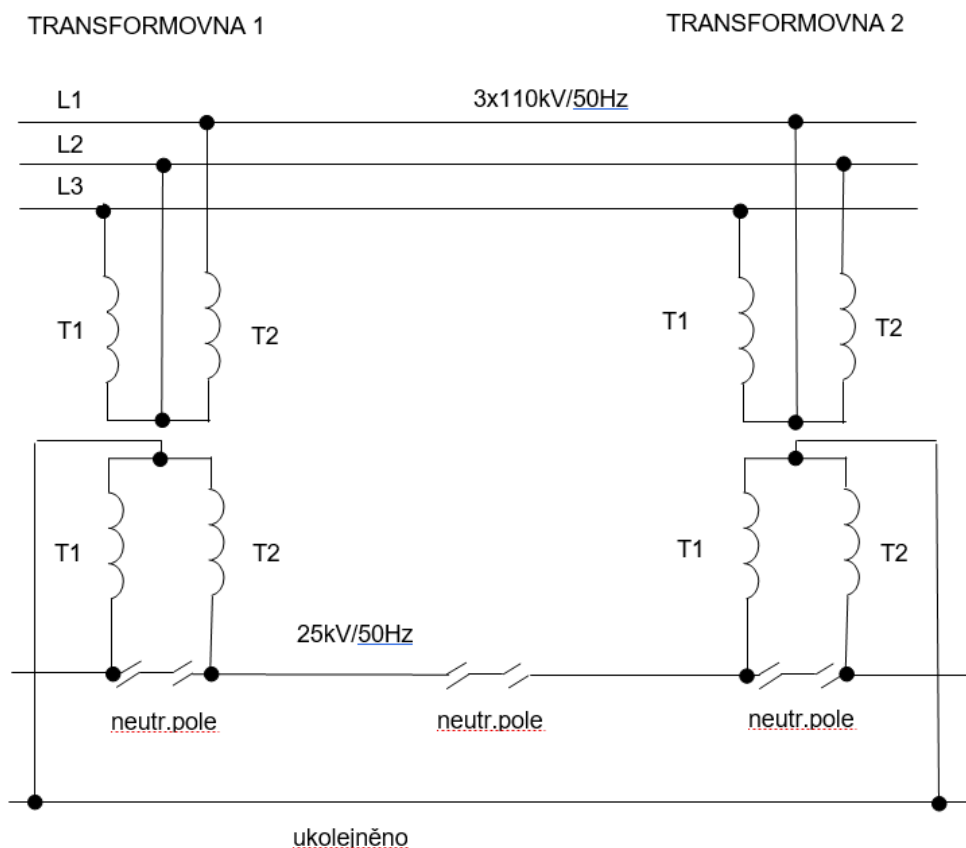
Napájení jednofázovou trakční soustavou 25 kV/50 Hz na části tratí v České republice je po technické stránce prakticky neměnné od jeho zavedení v 60. letech. Jedinou výraznější změnou bylo zkvalitnění odběru elektrické energie nasazením filtračně kompenzačních zařízení ke zvýšení účinnosti kompenzací jalového induktivního proudu a k potlačení lichých vyšších harmonických složek proudu, ovšem za cenu poměrně velkých trvalých ztrát.

Základem napájecí stanice 25 kV/50 Hz je jednofázový transformátor obvykle o výkonu 10-12,5 MVA. Transformátory jsou na primární straně vybaveny možností regulace napětí (2 x 8 odboček) pro vyrovnání napěťových výkyvů v síti 110 kV.

Z důvodu snahy o symetrizaci jednofázového odběru energie z veřejné třífázové distribuční sítě jsou obvykle v napájecí stanici dva jednofázové transformátory, každý připojený na jiné sdružené napětí (zapojení do otevřeného trojúhelníka, neboli do V) a každý transformátor napájí jiný traťový úsek. Vzhledem k nerovnoměrnému trakčnímu odběru v jednotlivých traťových úsecích však dochází k symetrizaci pouze částečně.

Zároveň díky napájení jednotlivých úseků trakčního vedení přes jednofázové transformátory z různých fází třífázového distribučního systému dochází v sousedních traťových úsecích k fázovému posuvu napětí v trakčním vedení a není možné u trakční napájecí stanice sousední úseky propojit jízdou se zvednutým sběračem vozidla. Z těchto důvodů jsou sousední úseky trakčního vedení v místě střídání fází odděleny neutrálním polem, které nežádoucímu propojení úseků zabráňuje, avšak je možno jím projíždět pouze bez odběru proudu. Díky existenci neutrálního pole není obvykle nutné při průjezdu na rozhraní napájených úseků stahovat sběrač. I přesto ale dochází při průjezdu k nežádoucímu přerušení napájení vozidla v oblasti neutrálního pole. Uvedená rozhraní jsou proto kryta návěstí „vypněte/zapněte proud“. Tyto návěsti nařizují vypnutí veškerého odebíraného proudu včetně pomocných spotřeb a topení vlaku, aby nedošlo k propojení vzdušného dělení v neutrálním poli obloukem, což by vedlo k mezifázovému zkratu.

Z podobného důvodu, tj. nestejná sdružená napětí – fáze - sousedních napájecích stanic, se neutrální pole nachází vždy také přibližně v polovině úseku mezi napájecími stanicemi. Na rozdíl od stejnosměrného systému či jednofázového systému 15 kV 16,7 Hz, které využívají spojitě dvoustranné napájení, se u systému 25 kV jedná o jednostranné napájení, což je nevýhodné (nevýhodou jsou vyšší úbytky napětí na trakčním vedení, vyšší ztráty při přenosu energie, omezené možnosti předávání rekuperované energie mezi vozidly, nespojité působení tažné i brzdící síly elektrodynamické brzdy, nespojitá činnost pomocných zařízení v trakčních vozidlech i ve vozech pro přepravu cestujících – vypínání klimatizace a technických zařízení stravovacích služeb).

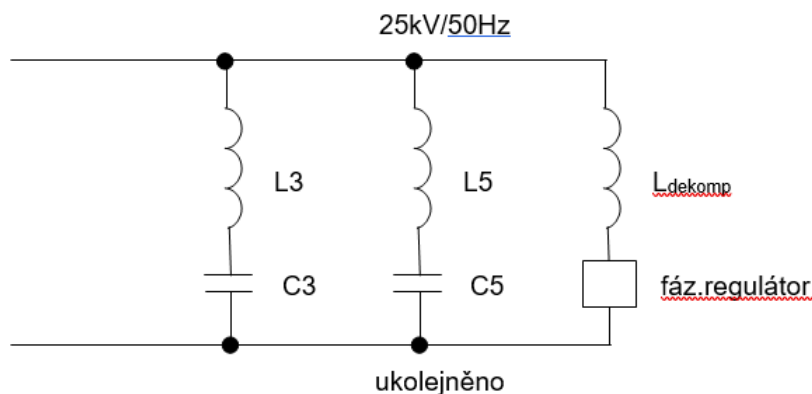


Obr 2.: Princip napájení soustavy 25 kV/50 Hz s transformátory zapojenými do „V“

Určitou možností omezení počtu v provozu nevhodných neutrálních polí je napájení tzv. do „T“, kdy je jeden traťový úsek zhruba v polovině napájen jedním sdruženým napětím. To však vede k větší nesymetrii odběru, neboť symetrizovat je možné pouze připojením sousedních napájecích stanic na rozdílná sdružená napětí.

Dosud nezmiňovanou a důležitou funkcí neutrálních polí je i rozdělení traťových úseků v případě napájení ze stejného sdruženého napětí. I v tomto případě je úseky nutné rozdělit pro zabránění přetoků energie přes trakční napájecí soustavu namísto veřejnou distribuční soustavou v případě rozdílných napětí téže fáze v distribuční síti v místech připojení trakčních napájecích stanic.

Řízené i neřízené usměrňovače starších typů hnacích vozidel se stejnosměrnými trakčními motory pro střídavou napájecí soustavu odebírají nesinusový, přibližně obdélníkový proud, který se vyznačuje přítomností složek s frekvencemi danými lichými násobky základní frekvence. Procentuální obsah těchto vyšších harmonických složek proudu s rostoucí frekvencí harmonických klesá. Avšak zejména 3. a 5. harmonická složka proudu jsou velmi výrazné a pro distribuční síť škodlivé, proto jsou v trakčních napájecích stanicích filtrovány. Druhým nepříznivým vlivem neřízeného usměrňovače, navíc doplněného o induktivní zátěž tvořenou transformátory a trakčními motory, je fázový posun proudu za napětím. Reálný účinník se v čase navíc mění v závislosti na zařazené odbočce primárního vinutí transformátoru vozidla, která koresponduje s požadovaným výkonem vozidla. Typické hodnoty účinníku starších vozidel se stejnosměrnými trakčními motory jsou 0,8 až 0,7, tedy pro distribuční síť neakceptovatelné, ke zlepšení účinníku jsou v trakčních napájecích stanicích statické kompenzátory.



Obr. 3: Principiální zapojení filtračně kompenzačního zařízení

Pro zlepšení kvality energie odebírané z distribuční energetické sítě byly proto všechny napájecí stanice pro trakční soustavu 25 kV 50 Hz v minulosti doplněny o filtračně kompenzační zařízení (FKZ). Jedná se zde o neřízené LC větve nalaďené přibližně na frekvence 3. a 5. (výjimečně i 7.) harmonické složky proudu. Tyto větve zkratují složky proudu s dotýčnými frekvencemi a ve vstupním proudu napájecí stanice se tyto harmonické složky prakticky neprojeví. Určitým nebezpečím je přetížení LC větví proudu, které na těchto frekvencích neprodukuje napájecí stanice, tedy vozidla, ale přicházejí ze strany distribuční sítě, nebo ovlivnění - utlumení signálu HDO. I proto musí být parametry FKZ navrhovány specificky pro konkrétní napájecí stanici.

Kapacity filtračních větví slouží zároveň pro kompenzaci jalové složky proudu odebíraného trakční sítí. Aby v případě malého nebo nulového trakčního odběru nedocházelo k překompenzování do oblasti kapacitního účinku, je potřeba tyto kompenzační kapacity naopak dekompenzovat k tomu určenou přidanou indukčností v sérii s fázovým regulátorem, tj. střídavým měničem napětí ve funkci měniče impedance, který řídí protékající dekompenzační proud. Právě dekompenzační větev spolu s větví pro filtraci 3. a 5. harmonické složky proudu odebírají činný výkon i při nulovém trakčním odběru a nezanedbatelným způsobem snižují jinak velmi dobrou účinnost napájecí stanice. Účinnost je jinak dána jen účinností jednofázového transformátoru a vlastní spotřebou napájecí stanice.

Soudobá vozidla s frekvenčně řízenými střídavými trakčními i pomocnými pohony se vstupními čtyřkvadrantovými měniči (pulsními usměrňovači) odebírají proud ve fázi s napětím a téměř sinusového tvaru, tedy FKZ nepotřebují. FKZ při jejich provozu způsobují zbytečné ztráty a v případě, že tato vozidla nejsou vybavena antirezonanční ochranou, dochází k rezonančním jevům, způsobujícím nepřijatelná přepětí, která vedou k poškození FKZ.

Jak již bylo uvedeno výše, současná napájecí soustava 25 kV/50 Hz je ve svém principu velice jednoduchá. Jediným složitým zařízením v napájecí stanici jsou FKZ, jejichž spotřeba nezanedbatelným způsobem snižuje účinnost napájecí stanice. Daní za jednoduchost je však nesymetrické zatížení veřejné distribuční sítě, nutnost rozdělit jednostranně napájené úseky s rozdílnými fázemi neutrálními poli a v neposlední řadě nutnost dimenzovat napájecí stanice na velké okamžité výkony, resp. vysoké poměry mezi maximálními a středními výkony, protože není možné rozdělit dodávaný výkon mezi sousední napájecí stanice.

Spolu s růstem rychlosti jízdy vlaků, a tedy výkonů trakčních vozidel, roste i nesymetrie zatěžování třífázové distribuční sítě jednofázovou trakční napájecí stanicí. Nesymetrickým odběrem proudu vzniklé různé hodnoty úbytků napětí na vnitřních impedancích jednotlivých fází třífázové soustavy vedou k nesymetrii napětí v třífázových distribučních sítích. Vůči takto nekvalitním parametrům energie v distribuční síti protestují ostatní spotřebitelé, neboť i poměrně malá nesymetrie napětí výrazným způsobem zvyšuje ztráty asynchronních motorů. To zkracuje životnost jejich izolačního systému. Proto jsou moderní pohony vybaveny ochranami,

kteřé je automaticky odpojující při nedržení symetrie třífázového systému. Ve snaze splnit kritéria kvality dodávek elektřiny nemohou distribuční společnosti tolerovat překračování dovolené nesymetrie odběru výkonu. Nesymetrický odběr nesmí překročit 0,7 % zkratového výkonu v místě k připojení k distribuční síti. Nesymetrie dodávané elektrické energie je též důvodem odmítavého přístupu distributorů k předávání přebytků rekuperované energie z trakčních napájecích stanic do distribuční sítě. Nežádoucí účinky zkreslení třífázového napětí nesymetrickým odběrem a nesymetrickou rekuperací se totiž sčítají.

Výsledkem je, že tradiční trakční napájecí stanice s jednofázovými transformátory nesplňují ani požadavky ze strany železnice (nezajišťují kvalitu napájení vlaků a spojitost odběru rekuperované energie podle technických podmínek pro interoperabilitu), ani požadavky ze strany energetiky (symetrie odebíraného i navraceného výkonu). Proto je nelze používat pro nové instalace.

3. Symetrizace napájecí stanice pomocí balancerů

Současná jednofázová trakční síť 25kV/50 Hz má několik zásadních nedostatků:

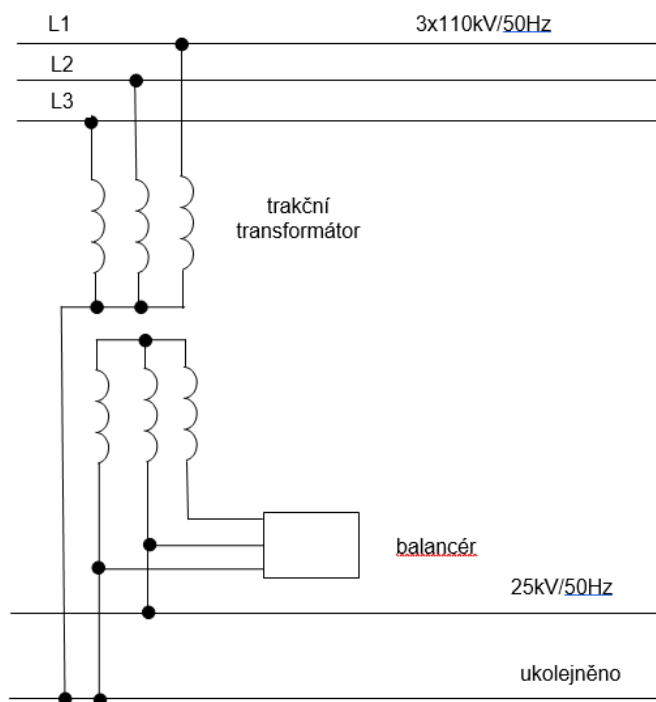
- Neodebírání sinusový proud, vozidla mají můstkový neřízený usměrňovač, jsou odebírány složky proudu s lichými násobky základní frekvence.
- Dochází k posunu proudu za napětím, což je dáno zátěží tvořenou neřízeným usměrňovačem a induktivní zátěží – stejnosměrnými motory se sériovým buzením.
- Nesymetricky je zatěžována trojfázová distribuční síť.
- Není možné traťové úseky napájet dvoustranně z důvodu možných přetoků energie i při případně stejné napájecí fázi sousedních úseků.
- V provozu dochází k pravidelnému střídání napájecích fází oddělených neutrálním polem s nutností přerušit odběr veškerého proudu, tato nevýhoda nabývá na významu se zvyšujícími se rychlostmi a tím i v čase častějším přerušováním proudu pro vlak.

První dva z výše uvedených nedostatků jsou postupně řešeny dodávkou nově koncipovaných vozidel. Nová vozidla mají na vstupní straně řízený pulsní (čtyřkvadrantový) usměrňovač, který odebírá téměř sinusový proud, který je navíc ve fázi s napětím. Při převažujícím počtu těchto vozidel v provozu se tak stanou zbytečnými i nekomplikovanější zařízení střídavé napájecí soustavy - FKZ.

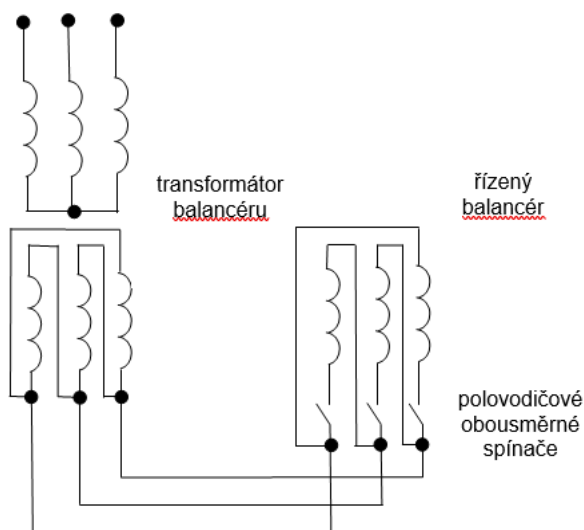
Další velkou nevýhodou střídavé soustavy 25 kV 50 Hz konvenční koncepce, tedy nesymetrii odběru energie, může odstranit nasazení řízených balancerů. Balancer umožní napájet trakční vedení jednotnou fází, tedy odpadá střídání fází. Avšak ani nasazení níže popsanych balancerů nevyřeší poslední dva problematické body, a to odstranění neutrálních polí na styku jednotlivých napájených úseků a s tím související nutnost pravidelně přerušovat odebíraný proud. Použití balancerů tedy neumožní zavedení dvoustranného napájení. Důvod proč nelze propojovat sousední napájecí stanice ani při systému jednotné fáze je v nestejných fázových úhlech stejných fází třífázové distribuční sítě v jejích různých bodech. Rozdíly fázového úhlu téhož napětí v různých bodech distribuční sítě činí až několik stupňů. Jsou způsobeny induktivními úbytky napětí na impedancích jednotlivých fází vedení či transformátorů v důsledku toku činného výkonu vedením.

I když by v případě aktivních balancerů bylo možné využít v celé trakční napájecí soustavě společnou fázi a symetrizaci odběru zajistit pomocí balancerů, nedokáže takové řešení zabránit přetokům netrakční energie trakční napájecí soustavou, v případě, že nebude rozdělena neutrálními poli (v případě rozdílných úhlů napětí v distribuční síti v místě připojení jednotlivých napájecích stanic), přetoky by poté způsobovaly zbytečné zatížení trakční napájecí soustavy.

Aktivní (řízený) balancér zajišťuje symetrické zatížení třífázové distribuční sítě při napájení jednofázové trakční sítě. V místě připojení má potom napájecí stanice vlastnosti jako třífázový transformátor se symetrickou zátěží. Zatímco při konvenčním způsobu napájení je trakční proud odebírán pouze ze dvou fázových vodičů třífázové sítě, při využití aktivního balancéru je tentýž proud rozdělen mezi všechny fázové vodiče distribuční sítě.



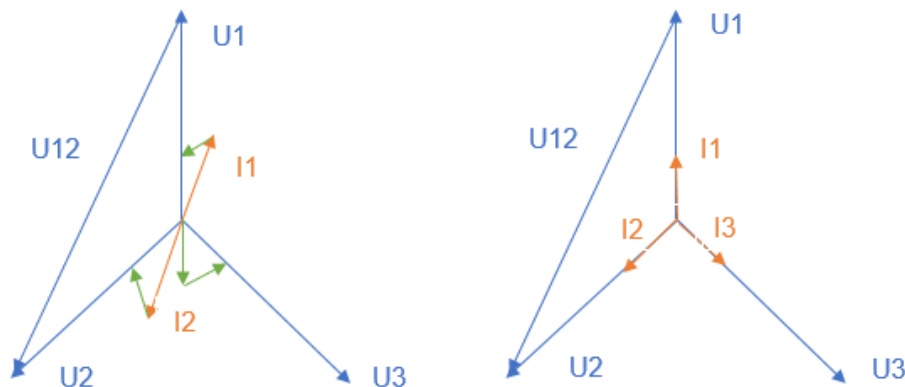
Obr. 4: Připojení balancéru k napájecímu transformátoru



Obr 5.: Zjednodušení zapojení balancéru

Schéma zapojení aktivního balancéru je na obr. 4 a 5. Přes třífázový transformátor jsou připojeny do trojúhelníka zapojené tlumivky s polovodičovými spínacími prvky. Jejich řízením je možné dosáhnout kladného i záporného jalového výkonu umožňujícího kompenzaci účinníku a symetrizaci fázových proudů, přičemž část zátěžného trakčního proudu je odebírána ze třetí fáze.

Princip činnosti aktivního balancéru je možné znázornit i na níže uvedeném fázorovém diagramu, obr. 6. Na levé části obrázku jsou tři fázová napětí a fázově posunuté proudy I_{L1} a I_{L2} trakcí zatížených fází, fázový posun je dán přítomností vozidel s neřízenými usměrňovači. Aktivní balancér při správné činnosti posune fázové proudy rovnoběžně s příslušnými napětími a zároveň sníží proud trakcí zatížených fází zatížením i fáze třetí proudem I_{L3} . Fázorový diagram představující požadovaný stav je na pravé polovině obrázku.

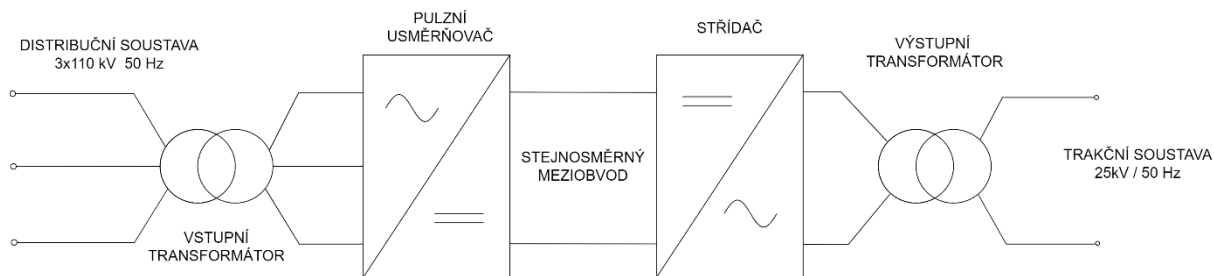


Obr. 6: Fázorový diagram znázorňující činnost balancéru

4. Technické řešení měničových napájecích stanic

Rozvoj vysokonapěťových výkonových polovodičových měničů pro energetické aplikace vytvořil předpoklady pro uplatnění těchto technologií i v drážních napájecích stanicích pro trakční soustavu 25 kV 50 Hz. Přínosy a možnosti měničových napájecích stanic jsou celkově shrnuty v dalším oddíle, v tomto oddíle budou popsána vlastní technická řešení, zejména měničové části.

Bloková struktura měničové napájecí stanice 25 kV 50 Hz s kaskádou měničů 3 AC /DC a DC/ 1 AC je uvedena na obr. 7.



Obr. 7 Bloková struktura měničové napájecí stanice

Zde je vhodné doplnit poznámku, která se vztahuje k terminologii v oblasti měničové techniky. Měniče, o kterých je zde pojednáváno, jsou koncipovány jako jednofázová nebo třífázová tranzistorová můstková zapojení s jednou stranou střídavou a jednou stranou stejnosměrnou a s možností toku elektrického výkonu v obou směrech, tedy ze strany stejnosměrné do strany střídavé nebo naopak. Zejména v drážní oblasti, ať jde o aplikace stacionární nebo mobilní, jsou tyto typy měničových struktur označovány jako čtyřkvadrantové

měníče nebo měniče 4Q. Kromě toho se v oboru výkonové elektroniky pro tato zapojení používají označení vycházející z převažujícího směru toku výkonu měničem v dané aplikaci. Převažuje-li tok výkonu ze stejnosměrné strany do střídavé, je běžně měnič označován jako střídač. Převažuje-li v dané aplikaci směr toku výkonu ze střídavé strany do stejnosměrné, je měnič označován jako pulsní usměrňovač, usměrňovač se šířkově pulsní modulací, PWM usměrňovač, rekuperační usměrňovač, kompatibilní usměrňovač nebo též jako AFE jednotka. V měničových napájecích stanicích se uskutečňuje směr toku výkonu převážně ze strany energetické distribuční sítě do strany trakční sítě. Z důvodu přehlednosti a jednoznačného rozlišení měničů bude proto v tomto článku označován měnič na straně energetické sítě jako pulsní usměrňovač a měnič na straně trakční sítě jako střídač.

Z obr. 7 je zřejmé, že z distribuční energetické soustavy 110 kV je napájena primární strana vstupního oddělovacího snižovacího třífázového transformátoru. Sekundární vinutí vstupního transformátoru napájí vstupní stranu třífázového pulsního usměrňovače. Jeho výstupní napětí vytváří stejnosměrný napěťový meziobvod, jehož napětí se zpravidla pohybuje v rozmezí 5 až 15 kV. Z tohoto meziobvodu je napájen výstupní jednofázový střídač, který pracuje s frekvencí 50 Hz. Zvýšení výstupního napětí střídače na hodnotu 25 kV (respektive 2 x 25 kV v případě aplikace systému s negativním napájecím vodičem) zajišťuje výstupní jednofázový transformátor, případně autotransformátor, jehož výstupním napětím se napájí trakční síť. Potřebných efektů měničové napájecí stanice, které budou popsány dále, se dosahuje prostřednictvím vhodného řízení měničových struktur.

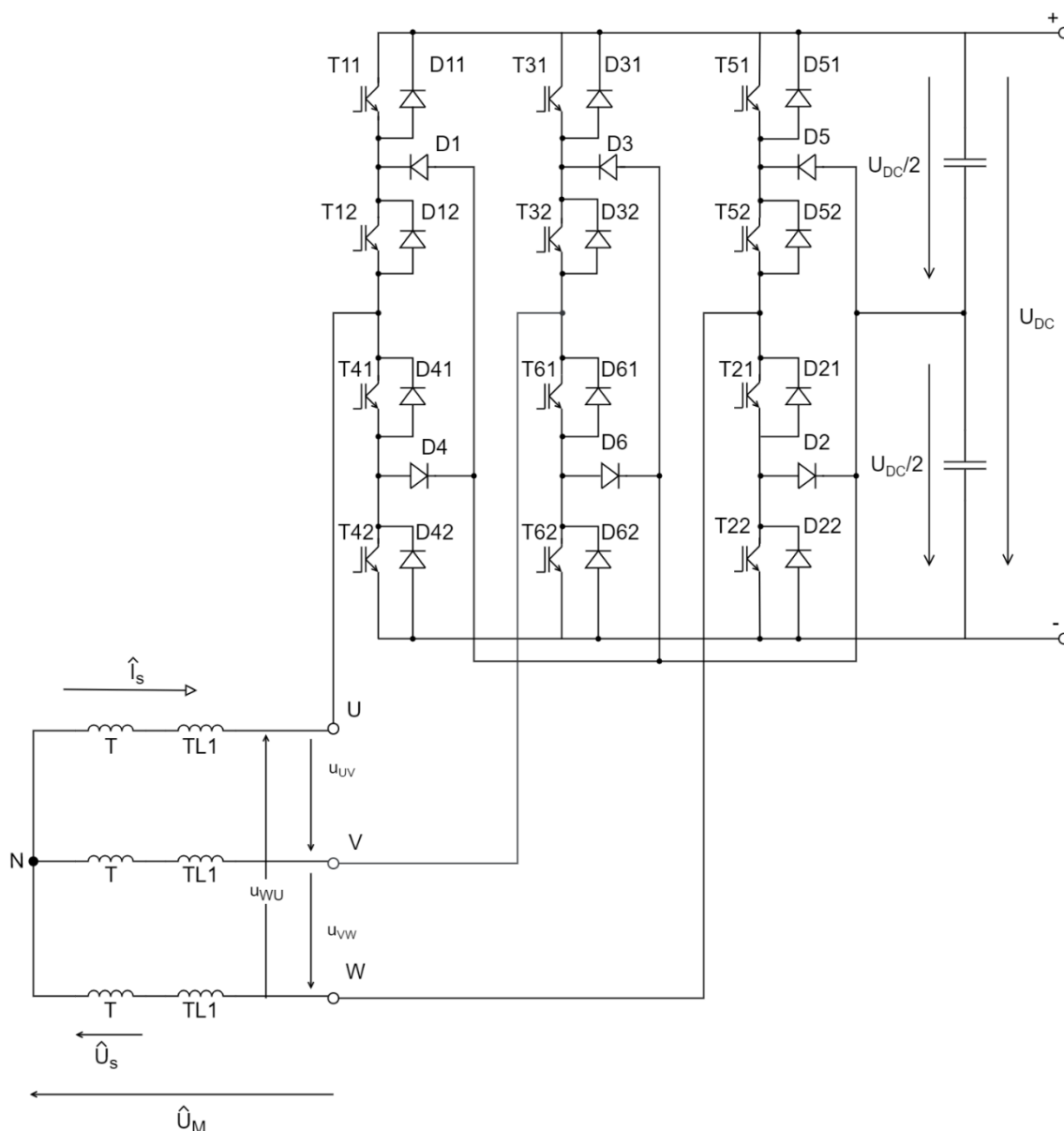
Popsaná bloková struktura měničové napájecí stanice je standardní. Konkrétní provedení měničů se však v jednotlivých aplikacích odlišují. Technická řešení měničů vycházejí ze standardních aplikací pro energetiku a jedná se vždy o vícehladinová zapojení.

Měničové technologie pro trakční napájecí stanice nabízejí ve světovém měřítku tři výrobci – ABB, GE a SIEMENS. Nemusí se jednat vždy o technologie pro trakční soustavu 25 kV 50 Hz či 60 Hz, respektive 2 x 25 kV 50 Hz či 60 Hz. Řada měničových napájecích stanic byla realizována pro trakční soustavu 15 kV 16,7 Hz například v Německu a ve Švýcarsku, zde se však nevyužívá kaskáda měničů 3 AC /DC a DC/ 1 AC, ale jednostupňový přímý měnič 3 AC/ 1 AC bez stejnosměrného meziobvodu. Stavebnicová koncepce některých měničových struktur však umožňuje využívat stejné výkonové bloky pro měničové napájecí stanice s přímými měniči i s měniči se stejnosměrným meziobvodem.

V tomto článku budou popsány dvě používané koncepce měničové výzbroje pro trakční napájecí stanice.

5. Vícehladinové měniče s kapacitním děličem

První koncepce měničových výzbrojí pro napájecí stanice je založena na použití vícehladinových měničů s kapacitními děliči na stejnosměrné straně. Spínací prvky mohou být realizovány IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), bývají ale také realizovány IGCT (Integrated Gate Controlled Thyristor), [8]. V konkrétní měničové výzbroji je uvedené koncepte využito jak v případě vstupního třífázového pulsního usměrňovače, tak v případě jednofázového střídače. Problematika vícehladinových měničů s kapacitními děliči na stejnosměrné straně byla již mnohokrát publikována, proto zde budou naznačeny stručně jen nejzákladnější skutečnosti na příkladu třífázového tříhladinového měniče, který je v měničových napájecích stanicích používán jako vstupní pulsní usměrňovač.



Obr. 8 Tříhladinový třífázový pulsní usměrňovač

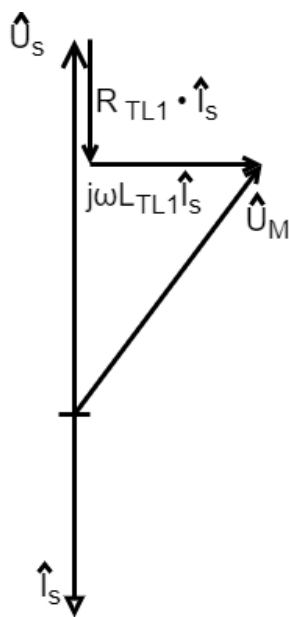
Základní schéma tříhladinového třífázového můstkového měniče ve funkci pulsního usměrňovače je uvedeno na obr. 8. Pulsní usměrňovač je napájen ze sekundárního vinutí třífázového transformátoru T a řídí pomocí šířkově pulsní modulace úbytek napětí na vstupních tlumivkách TL1 jako rozdíl napětí mezi napájecí sítí u_s a svorkami usměrňovače u_M . Úbytek napětí na tlumivkách TL1 je dán úbytkem na jejich odporu R_{TL1} a indukčnosti L_{TL1} . Situace je pro první harmonické složky obvodových veličin znázorněna na fázorovém diagramu na obr. 9 pro případ, kdy je ze sítě odebírána první harmonická složka proudu i_s ve fázi s první harmonickou složkou napětí u_s , účinník, se kterým pracuje soustava měnič – vstupní tlumivky vůči síti, se tedy blíží jedné. Činitel výkonu, který zahrnuje i vliv deformačního výkonu od vyšších harmonických složek, bude ale vlivem šířkově pulsní modulace měniče vždy mírně nižší, než 1.

Použití vícehladinového zapojení měniče je ve značné míře motivováno rozložením napětíového namáhání vysokonapětového měniče na více spínacích prvků v jedné větvi – fázi měniče. Oproti standardnímu třífázovému můstku se šesti tranzistory a šesti zpětnými diodami, což je zapojení dvouhladinové, přináší však vícehladinové zapojení měniče další efekty. Ty

souvisejí zejména s možností formovat střídavé napětí šířkově pulsní modulací ve větším počtu hladin, tedy s příznivějším harmonickým spektrem modulovaného napětí, oproti zapojení dvouhladinovému. Jednotlivé hladiny střídavého napětí jsou odvozeny z hodnoty napětí na stejnosměrné straně měniče. Pro plnou říditelnost měniče v případě jeho aplikace jako pulsního usměrňovače je nutné, aby napětí na stejnosměrné straně měniče bylo vyšší, než amplituda napětí střídavého napájecího zdroje.

Označíme-li podle obr. 8 celkové napětí na stejnosměrné straně měniče U_{DC} , mohou nabývat sdružená napětí na střídavé straně měniče okamžitých hodnot $-U_{DC}$, $-U_{DC}/2$, 0 , $+U_{DC}$, $+U_{DC}/2$, tedy pět napětíových hladin. Fázová napětí, vyznačená na obr. 8 jako napětí mezi fázemi měniče a středem napájecího zdroje, mohou nabývat hladin $\pm 2U_{DC}/3$, $\pm U_{DC}/2$, $\pm U_{DC}/3$, $\pm U_{DC}/6$ a 0 . Při formování šířkově pulsní modulace na střídavé straně tříhladinového měniče může být nastaveno 27 kombinací sepnutí polovodičových prvků. Celkově lze na střídavé straně měniče vytvořit 19 napětíových stavů. Je tedy zřejmé, že u některých napětíových stavů existuje více možností jejich nastavení. Existuje-li pro nastavení požadovaného napětíového stavu více kombinací sepnutí polovodičových prvků, je nutno použít konkrétní kombinaci s ohledem na udržování stálého potenciálu středu kapacitního děliče na stejnosměrné straně měniče a s ohledem na minimum přepínání polovodičových prvků při přechodu do nového napětíového stavu.

V měničových trakčních napájecích stanicích je struktura výstupního tříhladinového střídače analogická k popsané struktuře pulsního usměrňovače, v případě střídače se však jedná o jednofázové zapojení, oproti schématu na obr. 8 má střídač jen dvě větve s polovodičovými spínači.



Obr. 9 Fázorový diagram poměrů na střídavé straně pulsního usměrňovače

Reálné provedení měničové napájecí stanice využívající vícehladinových měničů s kapacitními děliči využívá vícevinutových transformátorů a skupinového řazení více vícehladinových měničů tvořících vstupní pulsní usměrňovač i výstupní střídač. Může se jednat například o konfiguraci, kde má vstupní síťový transformátor několik sekundárních vinutí, která napájejí skupinu tříhladinových pulsních usměrňovačů, které napájejí paralelně stejnosměrný meziobvod. Analogickým způsobem je pak řešena i výstupní část, kde je skupina tříhladinových jednofázových střídačů paralelně napájena ze stejnosměrného meziobvodu a každý střídač

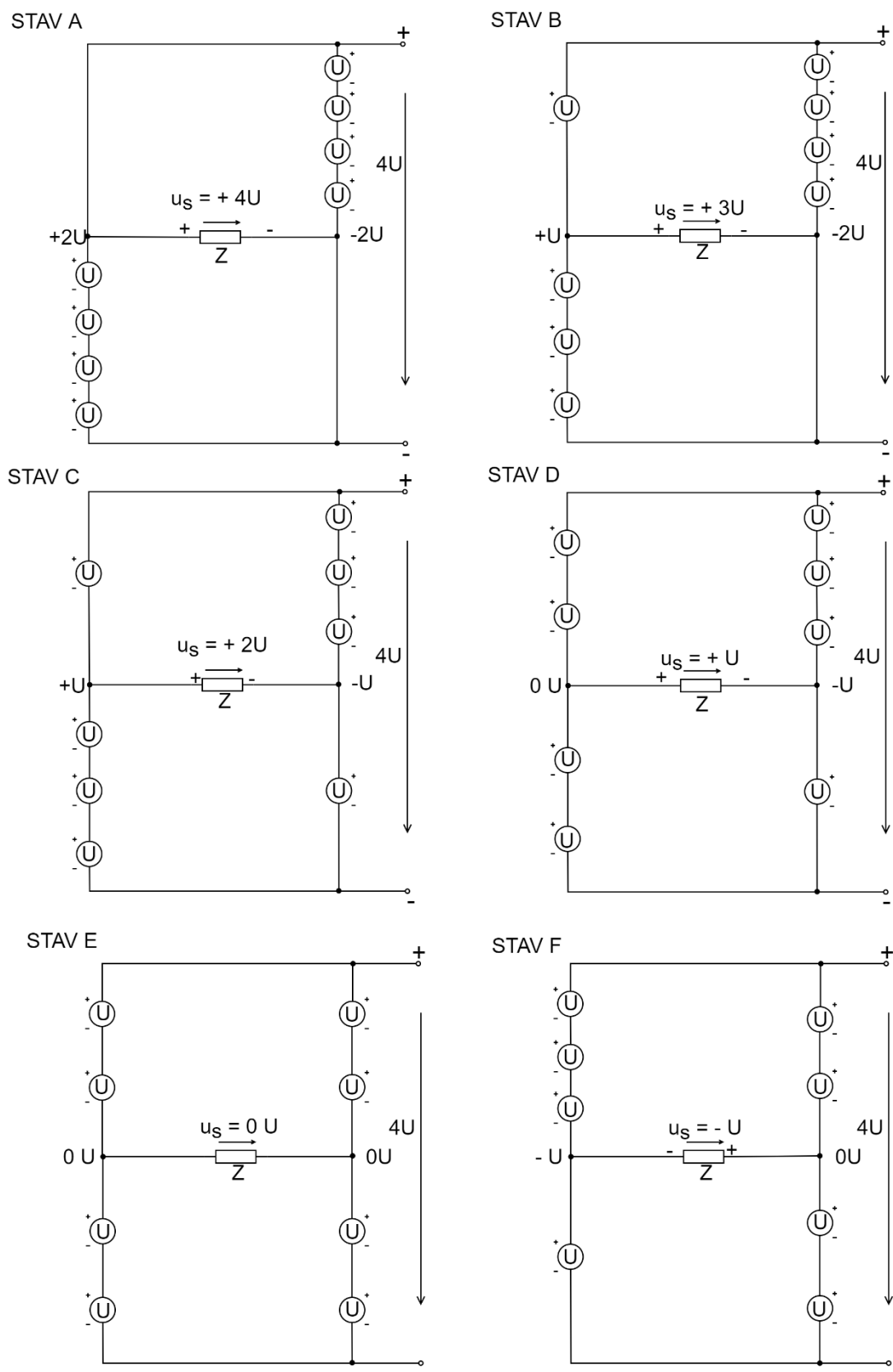
napájí jedno primární vinutí jednofázového výstupního vícevinutového transformátoru. Konkrétní struktura měničové napájecí stanice závisí na požadovaném výkonovém dimenzování a na požadavcích na redundanci. V jedné napájecí stanici může být využito více paralelně pracujících jednotek podle obr. 7.

6. Modulární vícehladinové měniče

Druhou měničovou strukturou používanou v měničových napájecích stanicích je modulární vícehladinový měnič s balančními kondenzátory. I přes vyšší složitost s určitou vazbou i na cenu se jedná o velmi progresivní řešení. Výhody této struktury jsou zejména následující:

- Energie stejnosměrného meziobvodu je rozložena ve větším množství menších kondenzátorů.
- Modulární topologie umožňuje jemnější odstupňování napětových hladin.
- Vlivem vyššího počtu napětových hladin je příznivější harmonická skladba obvodových veličin, čímž se snižují nároky na filtrační prvky a transformátory jsou méně zatěžovány ztrátovými výkony od vyšších harmonických složek proudu a napětí. To se příznivě projevuje i nižším akustickým výkonem generovaného hluku. To je důležité, neboť je potřebné usilovat o to, aby hluk související s provozem měničových trakčních napájecích stanic nesnižoval jejich vysokou užitnou hodnotu.
- Modulární koncepce dává předpoklady ke konstrukci měničů s dostatečnou redundancí a spolehlivostí.
- Použití jednoduchých standardních transformátorů.

Základní principy fungování modulárního vícehladinového měniče zde budou vysvětleny na příkladu jednofázového střídače, tedy výstupního měniče měničové napájecí stanice. Na obr. 10 je uvedeno šest schémat, které objasňují postup formování výstupního napětí jednofázového střídače na příkladu pětihladinového zapojení. Princip formování výstupního napětí je založen na definování potenciálu střídavé výstupní svorky (fáze) a tím i okamžité hodnoty výstupního napětí u_s na impedanci zátěže Z pomocí sérioparalelního řazení zdrojů napětí o hodnotě U . Potenciály výstupních svorek měniče jsou pro jednotlivé stavy vyznačeny v obr. 10. V případě pětihladinového zapojení podle obr. 10 je potenciál výstupní svorky definován kombinací řazení čtyř napětových zdrojů, které definují potenciál výstupní střídavé svorky měniče v možných hladinách $+2U$, $+U$, 0 , $-U$, $-2U$. Uvážíme-li v případě jednofázového střídače možnost nastavení uvedených potenciálů na obou výstupních střídavých svorkách a je-li výstupní napětí střídače u_s dáno rozdílem potenciálů těchto výstupních svorek, může okamžitá hodnota výstupního napětí u_s nabývat hodnot $+4U$, $+3U$, $+2U$, $+U$, 0 , $-U$, $-2U$, $-3U$, $-4U$. Zavedeme-li vhodnou sekvenci nastavování jednotlivých napětových stavů v obou větvích střídače, dosáhneme při nejjednodušším způsobu řízení, při tzv. obdélníkovém řízení, průběhu okamžité hodnoty výstupního napětí u_s za jednu periodu podle obr. 11. Část sekvence nastavování napětových stavů střídače v části periody výstupního napětí je znázorněna v obr. 10, v obr. 11 jsou velkými písmeny označeny intervaly odpovídající napětovým stavům v obr. 10. V jednotlivých větvích se mění počet napětových zdrojů připojených ke kladnému a zápornému pólu stejnosměrné strany měniče. V daném příkladu pětihladinového měniče je zřejmé, že počet svisle sériově řazených napětových zdrojů je v každé větvi konstantní, celkové napětí větve je stále rovno $4U$, toto je tedy zároveň stálá hodnota napětí na stejnosměrné straně měniče. Zároveň je zřejmé, že okamžitá hodnota napětí u_s na zátěži je dána součtem hodnot napětí napětových zdrojů ve dvou smyčkách (horní a dolní) podle II. Kirchhoffova zákona.



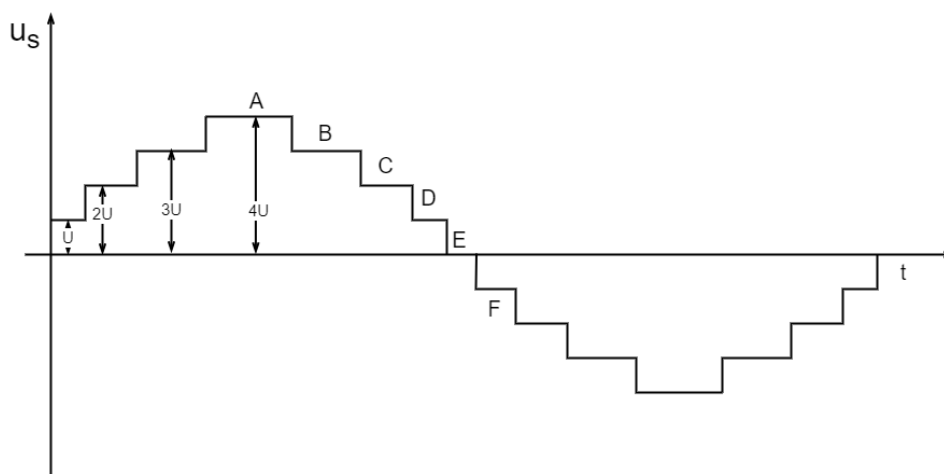
Obr. 10 K vysvětlení principu funkce vícehladinového modulárního měniče

Obrázky 12 a 13 se věnují praktické realizaci měničové struktury, která zabezpečuje funkci měniče tak, jak bylo vysvětleno pomocí principiálního obr. 10. V každé větvi měniče jsou sériově zapojeny dvě skupiny modulů M11 až M44 podle obr. 12, jedna skupina je zapojena ke

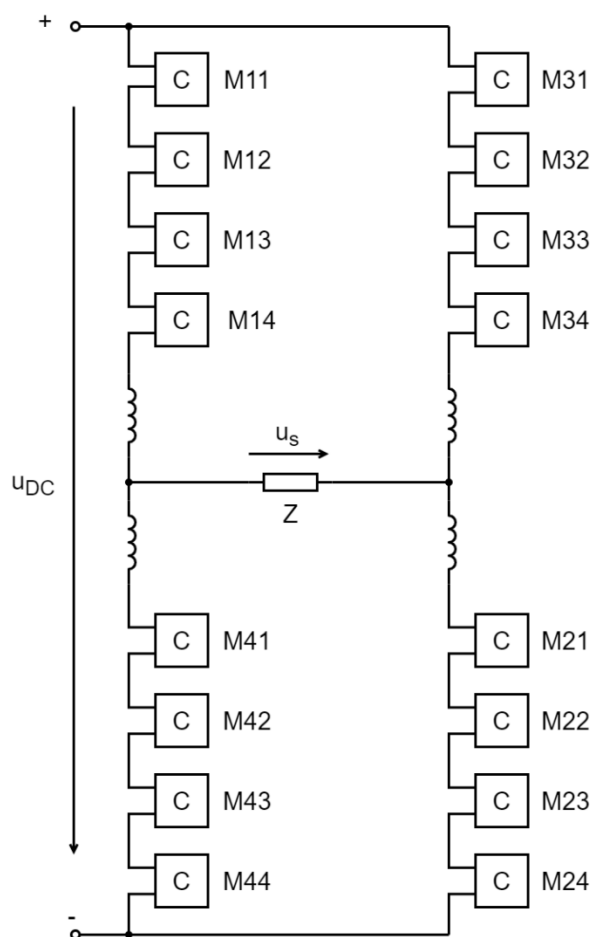
kladnému pólu stejnosměrné strany měniče, druhá k pólu zápornému. Celkový počet modulů v jedné skupině, tedy polovina počtu modulů jedné větve měniče, je roven počtu hladin měniče – 1. V případě pětihradínového měniče se tedy jedná o 4 moduly v jedné skupině a 8 modulů v jedné větvi (fázi). Na obr. 13 je znázorněno obvodové řešení jednoho modulu. Obvod na obr. 13 má vývody + a – paralelně k tranzistoru T2. Z hlediska těchto vývodů se modul může chovat jako zkrat s nulovým napětím nebo jako zdroj napětí U , což je napětí kondenzátoru C . Je evidentní, že kondenzátor C představuje praktickou realizaci zdroje napětí U z obr. 10. Jestliže je v modulu sepnut tranzistor T1, jedná se o stav, kdy je na vnějších vývodech modulu napětí U . To, zda se aktuálně proud uzavírá tranzistorem T1 nebo diodou D1, je dáno okamžitou polaritou proudu vnějších vývodů modulu. Je-li v modulu sepnut tranzistor T2, jsou vývody modulu zkratovány, o průchodu proudu T2 nebo D2 opět rozhoduje aktuální polarita proudu.

Má-li se tedy uvést do souvislosti obr. 10 s obr. 12 a 13, jde například při přechodu mezi stavy A a B na obr. 10 o proces, kdy se ve spodní skupině modulů v levé větvi přepne jeden z modulů M41 až M44 do stavu „zkrat“ a v horní skupině této větve jeden z modulů M11 až M14 přejde ze stavu „zkrat“ do stavu, kdy je na vývody modulu připojen kondenzátor s napětím U .

Je zřejmé, že stejnosměrná strana měniče nedisponuje jedním velkým společným kondenzátorem, ale kapacita stejnosměrné strany měniče je rozdělena do dílčích kondenzátorů v modulech. Tyto kondenzátory však nepředstavují ideální napěťové zdroje, ale při řízení měniče je nutno nejen dbát na správné formování střídavého napětí, ale i na udržování energie a tím i napětí U jednotlivých kondenzátorů. To se zajišťuje tak, že je-li v dané skupině modulů možnost výběru, u kterého modulu aktivovat připojení napětí kondenzátoru na vnější svorky (například při přechodu ze stavu A do stavu B je možno vybrat k aktivaci v horní skupině levé větve jeden ze čtyř modulů), zohledňuje se okamžité napětí kondenzátoru a požadavek na jeho trend – vybíjení nebo nabíjení. V případě, že má v modulu s připojeným kondenzátorem téci proud od vývodu + k vývodu -, volí se modul, u kterého je třeba napětí zvýšit, neboť kondenzátor se při dané polaritě proudu bude nabíjet, v případě opačné polaritě vnějšího proudu se aktivuje modul, jehož kondenzátor je třeba vybíjet, tedy u kterého je třeba snížit napětí.

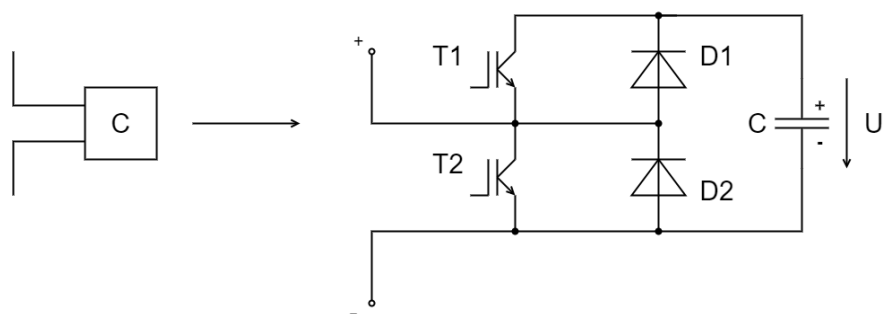


Obr. 11 Výstupní napětí jednofázového pětihradínového modulárního střídače při obdélníkovém řízení



Obr. 12. Praktická realizace pětihladinového jednofázového střídače

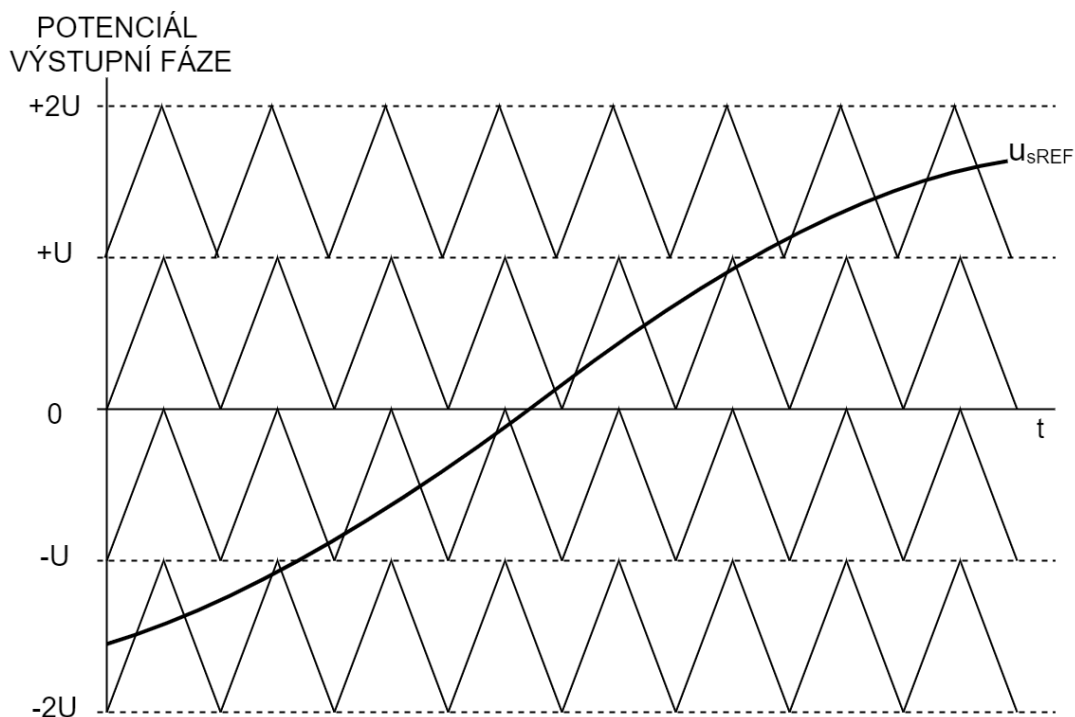
Vzhledem k tomu, že kondenzátory nejsou ideálními zdroji napětí a v jednotlivých modulech nebudou nikdy okamžitá napětí kondenzátorů zcela totožná, je třeba zabránit špičkám vyrovnávacích proudů při přepínání mezi stavy. Tyto špičky vyrovnávacích proudů jsou omezovány tlumivkami ve větvích měniče, které jsou znázorněny na obr. 12.



Obr. 13 Praktická realizace jednoho spínacího modulu modulárního vícehladinového měniče

Při řízení vícehladinových modulárních střídačů se využívá šířkově pulsní modulace. V tom případě je například průběh střídavého napětí na obr. 11 pulsně modulován s cílem říditelnosti efektivní hodnoty střídavého napětí u_s a s cílem formovat výstupní napětí s co nejpříznivější harmonickou skladbou. U vícehladinových měničů existuje více metod generování šířkově

pulsní modulace. Na obr. 14 je naznačen princip šířkově pulsni modulace, který vychází z analogie s elementární metodou šířkově pulsni modulace, která je založena na určování okamžiků přepínání stavů v měniči z komparace referenčního průběhu u_{REF} , který představuje obraz idealizovaného střídavého napětí, s pilovitým signálem. V případě pětihladinového střídače je přepínání mezi pěti napětovými stavy od $+2U$ do $-2U$ v jedné větvi (fázi) odvozeno od komparace referenčního sinusového průběhu napětí u_{REF} se čtyřmi pilovitými průběhy, kde každý pilovitý průběh určuje okamžiky přepínání mezi dvěma sousedními napětovými stavy.



Obr. 14 K vysvětlení principu šířkově pulsni modulace u vícehladinového modulárního měniče

V případě třífázového modulárního vícehladinového měniče je zapojení na obr. 12 doplněno ještě o další větev – fázi s dílčími moduly. Formování potenciálu této fáze se uskutečňuje zcela analogicky k provedení výkladu u jednofázového měniče. V analogii s obr. 14 je v každé fázi třífázového měniče porovnávána sinusová referenční hodnota potenciálu se čtveřicí pilovitých signálů, přičemž referenční průběhy potenciálů v jednotlivých fázích mají vzájemný fázový posun 120° . Analogické je i fungování třífázového modulárního vícehladinového pulsniho usměrňovače. V souladu s fázorovým diagramem na obr. 9 formuje pulsni usměrňovač taková střídavá napětí, aby rozdíl napětí mezi sítí a střídavými svorkami usměrňovače definoval požadovaný proud. Regulace proudu je zajištěna proudovými zpětnovazebními smyčkami, kde napětí formované na střídavé straně pulsniho usměrňovače vystupuje jako akční veličina pro zpětnovazební smyčky.

V měničových napájecích stanicích i v energetických aplikacích vícehladinových modulárních měničů se využívá zapojení s vysokým počtem hladin, kde může být v jedné skupině zapojeno až kolem deseti modulů, tedy až dvacet modulů na jednu větev (fázi). Jedná se o značné navýšení složitosti měniče a jeho řízení, takovéto měniče však umožňují ve vysokonapětových aplikacích formovat velmi kvalitní průběhy střídavých napětí s minimálním harmonickým zkreslením a z toho vyplývající řadou pozitivních dopadů. Kromě toho umožňuje

vyšší počet modulů využití spínacích prvků IGBT s nižšími napětovými hladinami, které se vyznačují lepšími dynamickými vlastnostmi, kratšími spínacími časy, menšími spínacími ztrátami a z toho plynoucími frekvencemi šířkově pulsní modulace k řádech kHz.

Filozofie výrobců modulárních vícehladinových měničů je taková, že jednotlivé moduly jsou unifikované a velikost napětové hladiny, se kterou má měnič pracovat, je pak dána počtem použitých sériově řazených modulů. Dalším efektem modulární koncepce je to, že počet použitých modulů je zpravidla vyšší, než by odpovídalo nutným požadavkům napětového dimenzování, je tedy použita určitá napětová rezerva (vnitřní redundance). Ta je využita v případě, kdy dojde k poruše některého z modulů. Tento modul je pak vodivě přemostěn a až do servisního zásahu může být měnič nouzově provozován, byť s řízením s menším počtem hladin napětí. Jedná se tedy o významný příspěvek k redundanci a spolehlivosti zařízení.

Měničové napájecí stanice a měničové bloky jsou koncipovány pro výkony desítek MVA, zpravidla 10 až 30 MVA. V jedné měničové napájecí stanici lze řadit více struktur podle obr. 7 paralelně. Měničové struktury jsou vybaveny vodním chlazením. V případě měničových napájecích stanic s modulárními vícehladinovými měniči se řešení zjednodušuje tím, že na výstupu se používá jednofázový autotransformátor.

7. Přínosy měničových napájecích stanic

I přes vyšší složitost a cenu měničových napájecích stanic jsou jejich technické výhody oproti konvenčním transformátorovým napájecím stanicím výrazné, a to jak z pohledu součinnosti s energetickou sítí, tak i z hlediska vlastností a možností trakční napájecí soustavy 25 kV 50 Hz. Přínosy měničových napájecích stanic se dále zvyšují při jejich vzájemné propojeném řízení.

Měničové napájecí stanice v první řadě odstraňují výrazné nedostatky konvenčních transformátorových napájecích stanic. Na straně energetické sítě se v první řadě jedná o zajištění symetrického třífázového odběru energie z distribuční sítě i symetrické předávání přebytků z rekuperačního brzdění do distribuční sítě. Tato skutečnost neznamená jen odstranění komplikací spojených s nesymetrickým odběrem energie, ale do budoucna se pravděpodobně bude v mnoha případech jednat o jediné technické řešení, které splní požadavky distributora energie spojené s kvalitou odebírané energie, zvláště u nově budovaných napájecích stanic. Zde se jedná především o nutnost splnění základní podmínky pro nesouměrnost odběru elektrické energie, při dvoufázovém odběru nesmí být u jednoho spotřebitele nesymetricky odebíraný výkon vyšší, než 0,7% zkratového výkonu v místě připojení a to v klouzavém časovém období 10 minut. Nesouměrnost odběru energie jednak poškozuje ostatní odběratele energie tím, že pro tyto odběratele je nesymetrickým odběrem narušena symetrie sítě, zároveň nesymetrický odběr blokuje kapacity přenosové soustavy, neboť při nesouměrném zatížení fázových vodičů lze odebírat jen 58% disponibilního výkonu. Požadavky na nesymetrické připojení se nebudou zmírňovat, spíše naopak. To je dáno jednak velmi problematickou realizací nových vedení jako liniových staveb, jednak postupnou změnou struktury energetických zdrojů. Odstavováním uhelných elektráren jako velkých zdrojů a posilováním významu lokálních zdrojů a energetických úložišť bude docházet pravděpodobně k tomu, že se budou zkratové výkony v připojovacích bodech spíše snižovat. Z hlediska toku výkonu charakterizují měničovou trakční napájecí stanici tři skutečnosti:

- Kladný či záporný činný výkon přechází z třífázové distribuční sítě do jednofázové trakční sítě a zpět.
- Trakční napájecí stanice poskytuje vozidlům potřebný jalový a deformační výkon (pokud jej vyžadují – starší ano, nová ne) bez jeho pronikání na vstupní stranu.

- Nezávisle na činnosti výstupní strany lze ze vstupní strany dodávat do distribuční sítě kladný či záporný jalový výkon (podpůrná služba).

Všechny tyto aspekty jsou v posledních letech navíc doplněny požadavky na rekuperaci trakční energie zpět do veřejné distribuce. Tradiční trakční transformovny tak nepředstavují jen nesymetrický odběr, ale nově také nesymetrický dvoufázový zdroj energie.

Dalším významným přínosem měničových napájecích stanic z pohledu součinnosti s energetickou sítí je eliminace vyšších harmonických složek proudu na vstupu napájecí stanice a říditelnost účinníku a jalového výkonu, s jakým pracuje napájecí stanice, díky použití vstupního pulsního usměrňovače. Tyto funkce zajišťuje pulsní usměrňovač v měničové napájecí stanici efektivněji, než filtračně kompenzační zařízení v konvenčních napájecích stanicích.

Z hlediska trakční napájecí soustavy 25 kV 50 Hz poskytují měničové napájecí stanice vždy stabilizaci trolejového napětí v napájecím bodě, případně i další efekty spojené s řízeným omezováním výkonu v situacích, kdy by hrozilo překročení přípustných maxim odebíraného výkonu, která korespondují v první řadě s limity ve smluvních podmínkách s distributorem elektrické energie. Nejvýraznějších efektů měničových napájecích stanic lze ale dosáhnout v případě součinnosti více napájecích stanic v dané oblasti. Zde lze dosáhnout výrazných pozitivních efektů jak ve směru k distribuční energetické síti, tak ve směru k trakčnímu napájení. Jedná se zejména o tyto přínosy:

- Systém jednotné fáze - zrušení střídání fází v trakčním vedení a tedy i neutrálních napájecích polí a provedení oboustranného napájení traťových úseků – odstraní se tím přerušování dodávek energie pro trakci i pro pomocná zařízení i odběru rekuperované energie pro jedoucí vlaky, sníží se ztráty výkonu i úbytky napětí v trakčním vedení.
- Snížení poměru mezi maximy odebíraného výkonu a jeho střední hodnotou ze strany distribuční energetické sítě – tato skutečnost má významný přínos z hlediska zrovnoměnění odběru z energetické sítě, po stránce ekonomické je zde přínos ve snížení hodnot požadovaného maximálního výkonu, který musí garantovat distributor – tento přínos bude nabývat na významu zejména v souvislosti s předpokládaným růstem poměru fixních plateb v ceně elektrické energie, kde tyto fixní platby s výškou rezervovaného výkonu vzrůstají. Tohoto pozitivního efektu je dosaženo cestou řízeného dělení výkonu mezi měničové napájecí stanice nezávisle na okamžitém rozložení vlaků na trati. Aby nedocházelo ke kolísání efektivní hodnoty napětí trakční sítě vlivem řízeného dělení výkonů, předpokládá se, že při tomto řízení není akční veličinou efektivní hodnota trolejového napětí v místě připojení napájecí stanice, ale vzájemné fázové posunutí napětí sousedních napájecích stanic.
- Souvislé oboustranné napájení traťových úseků s koordinovaným řízením výkonů napájecích stanic umožňuje zabránit nežádoucím přetokům energie energetické sítě přes trakční vedení. Těmto přetokům by nebylo možno zabránit při využití konvenčních napájecích stanic bez vložených neutrálních polí, omezení přetoků energie přes trakční síť není řešitelné ani pomocí balancérů. Riziko nežádoucích přetoků energie je dáno skutečností, že v různých místech energetické sítě není vlivem induktivních úbytků napětí striktně garantován totožný fázový posun napětí, rozdíly fázového posunu napětí jsou tedy hlavní příčinou rizik spojených s těmito přetoky. S rozvojem lokálních energetických zdrojů a energetických úložišť lze očekávat prohlubování tohoto problému s fázovým posunem.
- Spojité oboustranné napájení traťových úseků měničovými napájecími stanicemi zásadně zlepšuje podmínky pro rekuperaci. To je spojeno s efekty řízeného dělení výkonů mezi jednotlivé napájecí stanice. Zatímco v případě konvenčních napájecích stanic s neutrálními poli jsou možnosti rekuperace mezi vozidly navzájem velmi

omezené, zejména na jednokolejných tratích, a rekuperace do energetické sítě přináší řadu problémů. Proto bývá rekuperace zakazována, což je provozně i energeticky nežádoucí. Rekuperace totiž v tomto případě zvyšuje nesymetrie připojení a zvyšuje nerovnoměrnost výkonu v místě připojení, v případě spojitého napájení s měničovými napájecími stanicemi je velký potenciál pro rekuperaci energie v rámci trakční sítě – oblast spojitého napájení je velká, i v případě rekuperace do energetické sítě přes měničovou napájecí stanici je velmi pravděpodobná nižší výkonová nerovnoměrnost a zejména by se jednalo o rekuperaci bez nesymetrií.

- Dvoustranné spojitě napájení traťových úseků z měničových napájecích stanic zabezpečuje zvýšení tvrdosti trakční sítě, nedochází k tak výrazným poklesům napětí, jako v případě konvenčních napájecích stanic na koncích jednostranně napájených úseků. Zatímco v současnosti, při použití konvenčních napájecích stanic, jsou přípustné tolerance trolejového napětí od 17,5 kV do 27,5 kV, díky stabilizaci napětí měničovými napájecími stanicemi a vlivem spojitého napájení by napětí v trolejové síti za běžných provozních podmínek nemělo klesat pod 22,5 kV, aby se předešlo automatickému snižování trakčního výkonu vozidel. Měničové napájecí stanice jsou napěťové zdroje s říditelnou tvrdostí, což v běžných situacích zabezpečuje stálost efektivní hodnoty napájecího napětí, v případě přetížení sítě lze tvrdost trakční sítě a efektivní hodnotu napětí řízeně snižovat tak, aby nedocházelo k výkonovému přetížení. Ve spojení s moderními hnacími vozidly, která automaticky omezují svůj výkon v závislosti na aktuální hodnotě napětí v troleji, se takto vytváří systém se samočinným řízením výkonového omezení, čímž se omezují výpadky napájení a zvyšuje jeho spolehlivost.
- Sledovaným parametrem je u napájecích stanic jejich účinnost. Například u měničové napájecí stanice s vícehladinovými měniči s kapacitními děliči uvádí výrobce účinnost nad 97% v oblasti výkonů vyšších, než 25% výkonu jmenovitého. Pokles účinnosti s klesajícím zatížením je zde dán především ztrátami naprázdno v transformátorech. V případě použití modulárních vícehladinových měničů je sice struktura složena z více polovodičových součástek, to však neznamená pokles celkové účinnosti, neboť u těchto měničů lze používat součástky s nižšími hladinami napětí a lepšími parametry, zároveň jsou zde dány předpoklady pro velmi kvalitní promodulování napětí a proudů a tím omezení ztrát způsobených vyššími harmonickými složkami obvodových veličin v celém napájecím řetězci. I když by se mohlo zdát, že v případě měničových napájecích stanic jsou vždy horší podmínky pro dosažení dobré účinnosti vlivem vyšší složitosti oproti konvenčním napájecím stanicím, nemusí to tak být. U konvenčních napájecích stanic vykazuje nezanedbatelný ztrátový výkon filtračně kompenzační zařízení, a to zejména v případě nízkého zatížení trakční sítě. Měničové napájecí stanice vytvářejí předpoklady pro dosažení vyšší účinnosti i z hlediska širších souvislostí díky vytvoření velmi příznivých podmínek pro rekuperaci, zejména mezi vozidly. Dalším příspěvkem ke zvýšení účinnosti je stabilizace trolejového napětí měničovými napájecími stanicemi, a tudíž možnost dodávky výkonu pro hnací vozidla s vyšším napětím a menšími proudy s eliminací ztrát v trakčním vedení. Velmi podstatným energetickým přínosem měničových trakčních napájecích stanic je dvoustranné napájení, které významně snižuje ztráty v trakčním vedení.
- Spojitě napájení s měničovými napájecími stanicemi dává velmi dobré předpoklady pro dosažení dostatečné redundance a spolehlivosti napájení. Redundance se zde projevuje v několika úrovních. V dané oblasti se jednak uplatňuje zásada N-1, tedy napájení musí být zabezpečeno i při výpadku jedné napájecí stanice v oblasti. Další redundance může být dosaženo instalací více měničových struktur paralelně v jedné napájecí stanici. V případě vícehladinových modulárních měničů je redundance dosahována i řazením vyššího počtu modulů ve větvích měniče, než je nezbytné pro

správnou funkci. V případě poruchy modulu je možno jej přemostit kontaktem a měnič může pracovat dále. Další stupeň redundance se zajišťuje možností kontaktního překlenutí celé měničové sestavy v případě poruchy. V tomto případě není provoz napájecí stanice plnohodnotný, ale je umožněn alespoň nouzový provoz. Při spojitém napájení traťových úseků je pro tyto případy potřebné vkládání vypínačů, umožňující nouzově oddělit napájené úseky. Při návrhu napájení je nutno otázku redundance řešit pro danou oblast komplexně se zohledněním specifických podmínek. V každém případě přináší široké možnosti redundance měničových napájecích stanic a spojitého napájení ten efekt, že ve výsledku je v dané oblasti potřeba menšího počtu těchto napájecích stanic, než kdyby se využily konvenční napájecí stanice s jednostranným napájením traťových úseků s neutrálními poli, zároveň není v případě použití měničových napájecích stanic problematické zálohování napájení v případě výluk.

- Měničové napájecí stanice mají díky vstupním pulsním usměrňovačům říditelný účinník a jalový výkon na straně energetické sítě. To dává provozovateli takovýchto napájecích stanic technické i obchodní příležitosti k provozování služeb spojených s kompenzací jalového výkonu v energetické síti. Vlivem síťového charakteru železnice tak může vzniknout síť zdrojů jalového výkonu pro kompenzaci.
- Spojité napájení traťových úseků měničovými napájecími stanicemi umožňuje při záměrně nastaveném rozdílu výstupních napětí sousedních napájecích stanic generovat říditelné vyrovnávací jalové proudy trakčním vedením s využitím jejich tepelných účinků při rozmrazování případné námrazy či ledovky na troleji.

8. Závěr

Vzhledem k nedostatečným parametrům trakčního napájení stejnosměrným napětím 3 kV, což je dáno skutečnostmi uvedenými v úvodu tohoto článku, je v ČR předpoklad postupné konverze tratí napájených stejnosměrnou soustavou na trakční soustavu 25 kV 50 Hz. Zároveň se předpokládá elektrifikace dosud neelektrifikovaných tratí i tratí vysokorychlostních jen soustavou 25 kV 50 Hz. Pro tyto rozsáhlé investiční akce jsou zpracovávány odpovídající koncepční dokumenty včetně časových harmonogramů, například [1], [2]. Při zpracovávání koncepčních dokumentů byly uplatňovány simulační modely a energetické výpočty zahrnující predikce dopravních výkonů s ohledem na vývoj dopravy do roku 2050. Konverze napájecího systému je připravována po etapách s realizací do roku 2040. Jednotlivé etapy představují konverze napájecího systému na určených tratích nebo ve vymezených oblastech, například Ostravsko, Olomoucko, oblast Ústí nad Labem, oblast Prahy atd. Připravovaná konverze napájecího systému má jednoznačné dopady i na vozový park dopravců. Již několik let je nemyslitelné, aby si dopravci pořizovali nová vozidla jen pro stejnosměrnou soustavu 3 kV, nejčastěji se pořizují dvousystémová vozidla pro napájení 25 kV 50 Hz a 3 kV stejnosměrné. Pakliže se jedná o interoperabilní vozidla pro mezinárodní provoz, je již u dopravců standardem pořizování třísystémových vozidel pro soustavy 25 kV 50 Hz, 3 kV stejnosměrné a 15 kV 16,7 Hz. Připravují se plány na odstavování starších vozidel pro napájecí soustavu 3 kV stejnosměrné, u novějších vozidel pro tuto napájecí soustavu jsou zvažovány rekonstrukce na vozidla dvousystémová. Nutné vysoké uplatnění dvousystémových i třísystémových vozidel je evidentní nejen z důvodu současné existence dvou drážních napájecích soustav na území ČR, ale i z důvodu postupu konverze napájecího systému na jednotlivých tratích. V určitých etapách konverze je nutno počítat s kombinací obou napájecích soustav tak, že mnoho vlakových spojů mine styk obou proudových soustav během jedné jízdy i několikrát. Příprava a obměna vozového parku dopravců probíhá v současnosti nejen s ohledem na konverzi napájecího systému, ale je koordinována i se zaváděním jednotného evropského vlakového zabezpečovače

ETCS na hlavních tratích, neboť hnací vozidla budou muset být podle současných plánů vybavena povinně nákladnou vozovou částí nového vlakového zabezpečovače do roku 2025.

V současnosti je v ČR již připravena první investiční akce zaměřená na konverzi napájecího systému. Pro tuto akci jsou již vysoutěženi klíčoví dodavatelé a je rozpracovávána projektová dokumentace. Jedná se o konverzi napájecího systému ze 3 kV stejnosměrných na 25 kV 50 Hz ve 44 km dlouhém úseku mezi stanicemi Nedakonice a Říkovice na II. železničním tranzitním koridoru Břeclav – Přerov. V rámci této investiční akce budou instalovány dvě měničové trakční napájecí stanice 25 kV 50 Hz. První nová napájecí stanice bude u železniční stanice Otrokovice a bude realizována přestavbou ze současné drážní měnírny 3 kV stejnosměrné. Druhá napájecí stanice bude realizována jako přístavba k současné drážní měnírně pro systém 3 kV stejnosměrných u stanice Říkovice v blízkosti nového styku obou trakčních soustav. Měnírna 3 kV stejnosměrné bude zajišťovat nadále napájení trati ve směru na Přerov.

Obě nové napájecí stanice 25 kV 50 Hz, vzdálené od sebe 20 km, jsou dimenzovány na výkon měničové části 30 MVA. Toto dimenzování vychází jednak z predikce budoucího dopravních výkonů na základě energetických simulačních výpočtů, dimenzování je počítáno i pro napájení odbočné tratě Otrokovice – Vizovice, která má být elektrifikována, je počítáno s podporou napájení na dalších blízkých tratích připravovaných pro elektrifikaci (Kojetín – Hulín a Staré Město – Luhačovice /Bojkovice – Veselí nad Moravou). Dimenzování obou napájecích stanic počítá i s možností jejich vzájemného zálohování. V obou nových měničových napájecích stanicích budou instalovány vícehladinové měniče s kapacitními děliči na stejnosměrné straně osazené výkonovými spínacími součástkami IGCT.

Potenciál moderní železnice je v dopravním systému ČR obrovský a elektrická železnice je do budoucna jediným segmentem, který má předpoklady zajistit udržitelnou dopravu s dostatečnou kapacitou, rychlostí, bezpečností, energetickou hospodárností a šetrností vůči životnímu prostředí ve směrech nejsilnějších dopravních toků. Pro splnění této úlohy je nutné zajistit odpovídající technické prostředky v oblasti stavební infrastruktury, zabezpečovací techniky, vozidel i energetického napájení. Nástup nové generace technologií trakčního napájení, které byly přiblíženy v tomto článku, představuje v oblasti drážní energetiky bez nadsázky nejzásadnější technologický přelom od počátku elektrifikace hlavních tratí na území ČR v 50. letech 20. století.

9. Literatura k dalšímu studiu

- [1] Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění, studie zpracovaná SUDOP Praha a.s., Praha 2016
- [2] Změna trakční soustavy na AC 25kV, 50Hz v úseku Nedakonice - Říkovice, studie zpracovaná SUDOP Brno s.r.o., Brno 2017
- [3] Hasan, N. S., Rosmin, N., Osman, D., Musta'amal, A., H.: Reviews on multilevel converter and modulation techniques, časopis Renewable and Sustainable Energy Reviews, vydavatel Elsevier Ltd., ročník 2017, příspěvek 80, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307955?via%3Dihub>
- [4] Fernando Martinez-RodrigoSantiago de PabloL. Carlos Herrero-de Lucas: Current control of a modular multilevel converter for HVDC applications, časopis Renewable and Sustainable Energy Reviews, vydavatel Elsevier Ltd., ročník 2015, příspěvek 83, <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0960148115003171?token=92BDD3D2F811>

[F476CC28B64C119B024F36F6A81876227821DD1BB2537B83112292B8C2BFB96
E63597AFF2AF77C71CCCC](#)

[5] Firemní materiály SIEMENS

[6] Firemní materiály ABB

[7] Ročenky dopravy ČR, Ministerstvo dopravy ČR

[8] Novák, J.: Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti. Časopis ELEKTRO, roč.2003, č. 6, s. 6-12, Praha 2003. ISSN 1210-0889.

Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

