



## 1. Akumulátory NiFe a NiCd

### 1. 1. Historie niklokadmiových a nikloželezných akumulátorů

Kolem roku 1900 začal Edison s prvními experimenty na nabíjecích bateriích využívajících niklu, aby vyvinul funkční elektromobil. V roce 1910 předvedl Edison baterii, využívající niklovou kladnou elektrodu, železnou zápornou elektrodu a hydroxid draselný (KOH) jako elektrolyt. Díky robustní konstrukci baterie a velké cyklické životnosti dosáhl Edison obchodních úspěchů v mnoha různých aplikacích v USA. T. A. Edisonovi byl r. 1901 udělen patent na nikloželezný akumulátor.

Ve stejné době, kdy Edison pracoval na bateriích v USA, pracoval ve Švédsku Waldmar Junger na nikloželezné a později na niklokadmiové baterii. Výsledkem jeho úspěšných pokusů se stala niklokadmiová baterie s kapsovými elektrodami, která našla široké uplatnění v Evropě. Waldmaru Jungerovi byl udělen patent na niklokadmiový akumulátor v r. 1899.

Během 2. Světové války byla v Německu vyvinuta NiCd baterie se sintrovanými elektrodami, jenž nabízela mimořádně vysokou energetickou hustotu v porovnání s ostatními nabíjecími bateriemi. Otevřené NiCd baterie se začaly původně používat v leteckých aplikacích, kde byla hlavním parametrem vysoká výkonnost, bez ohledu na cenu.

V padesátých letech 20. století vyvinuli evropští výzkumníci revoluční NiCd baterii, která umožňuje vnitřní rekombinaci plynů vzniklých při přebíjení místo jejich úniku ventilem z článku. Rekombinace plynů uvnitř článku umožnila vznik uzavřených NiCd bateriím s vynikajícím výkonem. Díky své vysoké energetické účinnosti nacházejí uzavřené NiCd články neustále široké uplatnění.

### 1. 2. Alkalické akumulátory s kapalným elektrolytem

Alkalické akumulátory jsou svou konstrukcí uzpůsobeny k dlouhodobé službě. Vydrží-li olovený automobilový akumulátor 3 až 4 roky, staniční olovená baterie 5 až 10 let, vydrží alkalický akumulátor deset až dvacet let a byly dokonce zaznamenány případy, kdy nikloželezná trakční baterie pracovala i 40 let. Niklokadmiová baterie představuje nejspolehlivější systém baterií dostupný v současnosti na trhu. Její jedinečné vlastnosti umožňují použití v aplikacích a prostředích nepříjemných pro ostatní dostupné bateriové systémy.

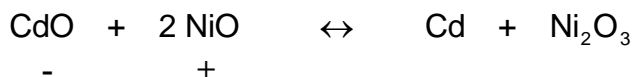
Akumulátory se vyrábějí jako otevřené. Otevřeným článkem se rozumí článek opatřený odšroubovatelným víčkem s tlakovou pojistkou. Tímto způsobem jsou provedeny hlavně články velkých výkonů, kde plyny mají kontakt s okolní atmosférou a z tohoto důvodu snesou bez jakýchkoliv jevů mnohonásobné přetížení, hlavně při vybíjení.

Elektrolytem u těchto akumulátorů je 20 až 22%ní roztok hydroxidu draselného (KOH) nebo sodného NaOH v destilované vodě. Podle složení elektrod se alkalické akumulátory dělí na niklokadmiové a nikloželezné. Z hlediska průmyslové výroby jsou právě tyto dva typy nejrozšířenější.

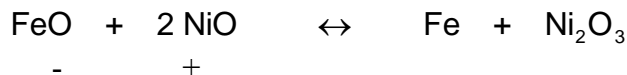
Kladné elektrody tvoří vždy oxid nikelnatý s příměsí zlepšující vodivost. Touto příměsí je šupinkový nikl nebo grafit. Záporné elektrody mají odlišné složení u jednotlivých

typů alkalických akumulátorů. Tvoří je směs kadmia, železa a oxidů železa. Kadmium zlepšuje vlastnosti železné elektrody. U nikloželezných akumulátorů je aktivní část záporné elektrody z práškového železa a jeho oxidů s menším množstvím oxidu rtuti a speciálních příměsí. Základní chemické reakce probíhající v těchto akumulátorech jsou:

oxid kademnatý      oxid nikelnatý      oxid niklitý



pro niklokadmiové akumulátory a

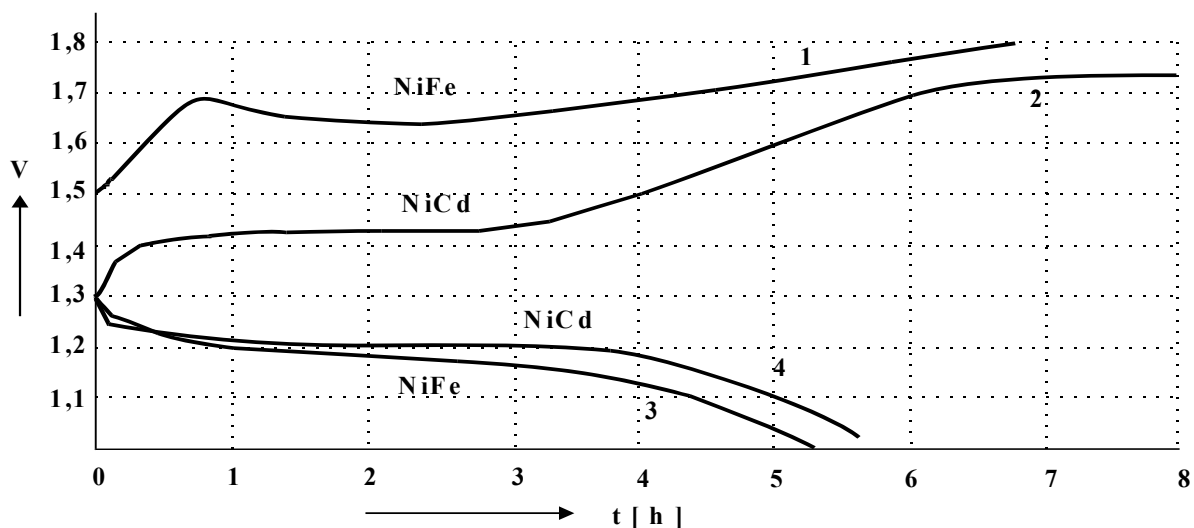


pro nikloželezné akumulátory.

Šipka doprava značí chemickou reakci při nabíjení, doleva při vybíjení. Narozdíl od olověných akumulátorů není hustota elektrolytu znakem nabití akumulátoru. Přesto je třeba tuto hustotu pravidelně měřit. V provozu se hustota zmenšuje a tím se zmenšuje i kapacita akumulátoru. Jakmile je hustota menší než  $1.16 \text{ g/cm}^3$ , je třeba elektrolyt vyměnit.

Napětí jednoho článku naprázdno po nabití je 1.4 až 1.48 V. Po určité době se toto napětí sníží na stálou hodnotu 1.3 až 1.4 V. Tento jev se vysvětluje rozkladem vyšších nestálých oxidů niklu na nižší oxidy a plynný kyslík. Koncentrace a teplota elektrolytu nemají na napětí téměř žádný vliv.

Elektrické vlastnosti obou typů alkalických akumulátorů nejlépe objasňují nabíjecí a vybíjecí křivky na obr. 1.1.



Obr. 1.1. Nabíjecí ( 1, 2 ) a vybíjecí ( 3, 4 ) křivky alkalických akumulátorů

Napětí nikloželezného akumulátoru se při nabíjení rychle zvětší na 1.6 až 1.65V (1). Pak při dalším nabíjení (asi po 2/3 nabíjecí doby) zůstává celkem stálé. V závěru nabíjení se napětí opět zvětší až na 1.8 až 1.85 V. Nabíjecí napětí niklokadmiového akumulátoru je asi o 0.2 V menší (2), v začátku nabíjecí doby se rychle nezvětšuje. V prvních dvou třetinách nabíjecí doby se napětí akumulátoru pohybuje v rozmezí asi 1.4 až 1.45 V a v poslední třetině se napětí prudce zvětší na 1.7 až 1.8 V s nepatrnou tendencí se dále zvětšovat. U

nikloželezného akumulátoru se na elektrodách již v začátku nabíjení vyvíjejí plyny, u niklokadmiového se plynů vyvíjí jen velmi málo a ponejvíce až ke konci nabíjení. Energetická účinnost nikloželezného akumulátoru je asi o 10% menší než u niklokadmiového. Vybíjecí křivky obou akumulátorů mají přibližně stejný průběh. Nikloželezný má větší počáteční napětí (3), to se však při vybíjení zmenšuje rychleji a jeho průměrné napětí je menší než průměrné napětí niklokadmiového (4). Vnitřní odpor alkalických akumulátorů je větší než je u olověných, přičemž niklokadmiový akumulátor má vnitřní odpor menší než nikloželezný.

Články těchto akumulátorů se běžně spojují do série stejně jako olověné. Starší konstrukce těchto akumulátorů mají desky článků spojené do sad, přičemž krajní kladné desky nejsou izolovány od článkové kovové nádoby. Sada záporných desek je izolována od kladných desek pryžovými tyčinkami a od stěn nádoby pryžovými profilovými vložkami. Nádoba článku bývá svařena z ocelového plechu, přičemž sady kladných elektrod bývají mnohdy svařeny se dnem nádoby. Pod deskami je kalový prostor, v němž se usazuje činná hmota, vymývaná z desek. Nad hladinou elektrolytu je prostor pro plyny. Vzdálenost mezi horní hranou elektrody a víkem bývá mezi 20 až 70 mm. Větší vzdálenost sice přispívá ke zvětšení velikosti akumulátoru, ale údržba je snazší, protože objem elektrolytu v akumulátoru je potom dost velký a nemusí se tak často doplňovat elektrolyt. Výška hladiny elektrolytu má být asi 15 mm nad deskami. V bateriích jsou akumulátory umístěny v dřevěných bednách nebo rámech nebo na kovových kostrách. Jednotlivé akumulátory musí být mezi sebou pečlivě izolovány, aby nedošlo ke zkratům.

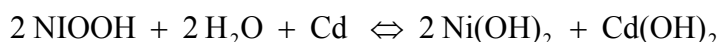
### 1. 3. Moderní konstrukce NiCd akumulátorů

V současné době se většina světových výrobců orientuje na výrobu niklokadmiových akumulátorů, protože vzhledem k nikloželezným mají větší energetickou účinnost. Oproti starším konstrukcím jsou uplatňovány nové technologie a nejnovější poznatky vývojových pracovišť. Moderní konstrukce akumulátoru je zobrazena na obr. 1. 2.

Niklokadmiový akumulátor používá jako aktivní materiál pro kladnou desku hydroxid nikelnatý a pro zápornou desku hydroxid kademnatý. Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu draselného obsahující malé množství hydroxidu lithého pro zlepšení životnosti během cyklu a pro zlepšení funkce při vysokých teplotách. Roztok je optimalizován tak, aby dodával co nejlepší kombinaci výkonu, životnosti, energetické účinnosti a širokého teplotního rozsahu. Elektrolytu se používá pouze pro přenos iontů, během nabíjecího / vybíjecího cyklu nedochází k jeho chemickým změnám ani znehodnocování.

V případě olověné baterie kladná a záporná aktivní složka chemicky reagují s elektrolytem (kyselinou sírovou), což vede ke stárnutí. Nosná konstrukce kladné i záporné desky je z oceli. Ta zůstává elektrolytem nedotčena a uchovává si pevnost po celou dobu životnosti článků. U olověných baterií je základní konstrukce u obou desek z olova a oxidu olovnatého. Tyto látky se zúčastňují elektrochemických pochodů a přirozeně korodují v průběhu životnosti baterie.

Chemická reakce při nabíjení a vybíjení niklokadmiové baterie je:



Během vybíjení se trojmocný hydratovaný oxid nikelnatý redukuje na dvojmocný oxid nikelnatý a kadmium u záporné desky je oxidováno na hydroxid kademnatý. Při nabíjení se uskutečňuje opačná reakce, dokud potenciál článku nestoupne na úroveň, kdy se začne uvolňovat vodík u záporné desky a kyslík u kladné desky, což vede k úbytku vody.

Na rozdíl od olověné baterie, dochází během nabíjení a vybíjení k minimální změně hustoty elektrolytu. To umožňuje používat značnou rezervu elektrolytu bez ovlivnění elektrochemických procesů mezi deskami. Vzhledem k jejímu elektrochemickému principu je chování nikl-kadmiové baterie stabilnější než u olověné baterie, je jí dána vyšší životnost, lepší charakteristiky a větší odolnost proti nepříznivým podmínkám. Nikl-kadmiové články mají nominální napětí 1,2 V.

**Těsnění pólového vývodu (svorníku)**

Je mechanicky připevněno a zajišťuje vynikající těsnost. To minimalizuje usazení uhlíku

**Zátka****Separátory**

Oddělují a izolují od sebe desky a rámy desek elektrod opačných polarit. Separátory umožňují volnou cirkulaci elektrolytu mezi deskami

**Sběrnice sestavy elektrod**

Spojuje jednotlivé desky elektrod s pólovým vývodem. Pólový vývod je k sběrnici bodově přivařen, praporec desek spojeny šroubem, nebo přivařeny

**Praporec desky**

Bodově svařený s bočními rámy desky, s horní hranou kapsy desky

**Deska**

Utěšňuje kapsy desek a slouží jako sběrač proudu.

**Rám desky**

Utěšňuje kapsy desek a slouží jako sběrač proudu

Obr. 1. 2. Konstrukční prvky baterie s lisovanými deskami

Konstrukce desky

Niklokadmiový článek se skládá ze dvou skupin desek: kladné obsahují hydroxid nikelnatý, záporné hydroxid kademnatý. Aktivní složky baterie s lisovanými deskami jsou umístěny v kapsách vytvarovaných z ocelových perforovaných pásků. Tyto kapsy jsou mechanicky spojeny, oříznuty do velikosti odpovídající šířce desky a slisovány do konečného rozměru desky. Výsledkem tohoto procesu je mechanická pevnost desky. Navíc ocelové pouzdro, ve kterém je umístěna aktivní část desky, zlepšuje vodivost a minimalizuje zvětšování elektrod. Desky jsou následně přivařeny nebo přišroubovány k vodivé sestavě sběrnice, což poskytuje mechanickou a elektrickou stabilitu výrobku.

Niklokadmiové baterie mají výjimečně dlouhou životnost a dosahují vysokého počtu cyklů, protože jejich elektrody nejsou postupně oslabovány korozí - konstrukční prvek desky je z oceli. Aktivní součást desky není konstrukční, pouze elektrická. Zásaditý elektrolyt s ocelí nereaguje, což znamená, že nosná konstrukce baterie zůstává nedotčena a nezměněna po celou dobu životnosti baterie. Naopak desky olověné baterie jsou jak konstrukčním, tak aktivním materiálem, což vede k opotřebení materiálu kladné elektrody a případně ke konstrukčnímu zhroutení.

## Izolace

Oddělení desek je zajištěno plastickými separátory vyrobenými vstřikováním, které navzájem oddělují a izolují desky elektrod. Protože je mezi kladnou a zápornou deskou dostatečný prostor a dostatečné množství elektrolytu, je zajištěna dobrá cirkulace elektrolytu a rozptýl plynů a nedochází k rozvrstvení elektrolytu jako u baterií olovo/kyselina.

## Elektrolyt

Elektrolyt používaný v bateriích je roztokem hydroxidu draselného a hydroxidu lithného, je optimalizován tak, aby podával co nejlepší kombinaci výkonu, životnosti, energetické účinnosti a širokého teplotního rozsahu. Koncentrace standardního elektrolytu je taková, aby článěk mohl fungovat v teplotních extrémech - při minimu  $-20^{\circ}\text{C}$  a maximu  $+60^{\circ}\text{C}$ . To umožňuje, aby se přizpůsobil velmi vysoké teplotní fluktuaci v určitých oblastech. Při velmi nízkých teplotách lze použít zvláštní elektrolyt s vyšší hustotou. Důležitým znakem těchto baterií je fakt, že elektrolyt nepodléhá změnám během nabíjení a vybíjení. Uchovává si schopnost přenášet ionty mezi deskami článku bez ohledu na úroveň nabití. Ve většině aplikací si elektrolyt uchová svou účinnost po celou dobu životnosti baterie a není třeba ho vyměňovat. Za jistých okolností, jako např. při delším používání za vysokých okolních teplot, se může v elektrolytu zvýšit obsah uhličitanu. Dojde-li k tomu, výkon baterie lze zlepšit výměnou elektrolytu. Elektrolyt se vyměňuje u akumulátoru vybitého, aby se zamezilo oxidaci kovového kadmia vzduchem. Tato operace se nedoporučuje realizovat bez konzultace s výrobcem baterie.

## Pólové vývody

Svorníky pólových vývodů jsou osvědčenou metodou přivařeny k sběrným desek. Tyto svorníky jsou vyrobeny z ocelové tyčoviny, opatřeny závitem pro našroubování spojovacího materiálu a poniklovány. Těsnění mezi víkem nádoby a miskou svorníku zajišťuje stlačené elastické pryžové těsnění upevněné spodní matkou svorníku. Tato konstrukce je navržena tak, aby poskytovala uspokojivou těsnost po celou dobu životnosti akumulátorového článku.

## Zátka

Akumulátory jsou osazovány speciálními zátkami se sklápěcími víčky, které vytvářejí účinný a bezpečný větrací systém.

## Nádoba akumulátorového článku

Materiál nádoby článku je odolný průsvitný polypropylén osvědčený v konstrukci baterií. Víko a nádoba článku jsou opatřeny speciálními natavovacími rámečky, které po svaření vytváří homogenní spoj.

## **1. 4. Provozní vlastnosti**

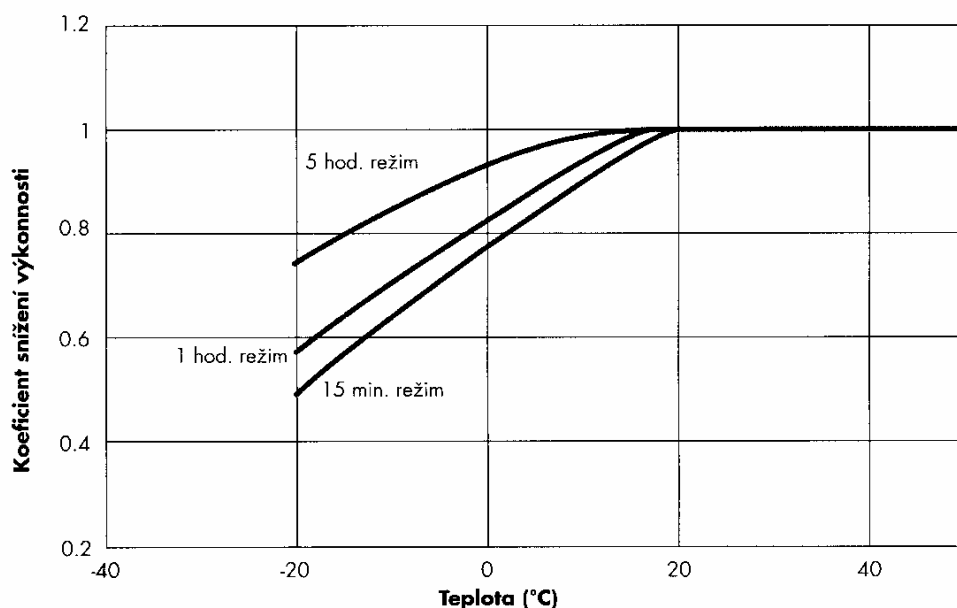
### Vnitřní odpor

Vnitřní odpor článku se mění v závislosti na teplotě a stavu nabití, a proto je těžké jej přesně definovat a změřit. Nejdůležitějším parametrem pro běžné aplikace je závislost vybíjecího napětí na změně vybíjecího proudu. Vnitřní odpor článku s lisovanými elektrodami závisí na výkonnosti dané typové řady a na velikosti kapacity článku. Normální hodnoty vnitřních odporů jsou uvedeny v katalozích výkonnostních údajů.

Normální hodnoty platí pro úplně nabitě články. Při nižším nabití se hodnoty vnitřního odporu zvyšují. Při 50 % vybití článku vzroste vnitřní odpor zhruba o 20 %, a při 90 % vybití vzroste zhruba o 80 %. Vnitřní odpor zcela vybitého článku nemá v praxi význam. Pokles teploty rovněž zvyšuje vnitřní odpor - při 0 °C je vnitřní odpor vyšší zhruba o 40 %.

### Vliv teploty na výkonnost

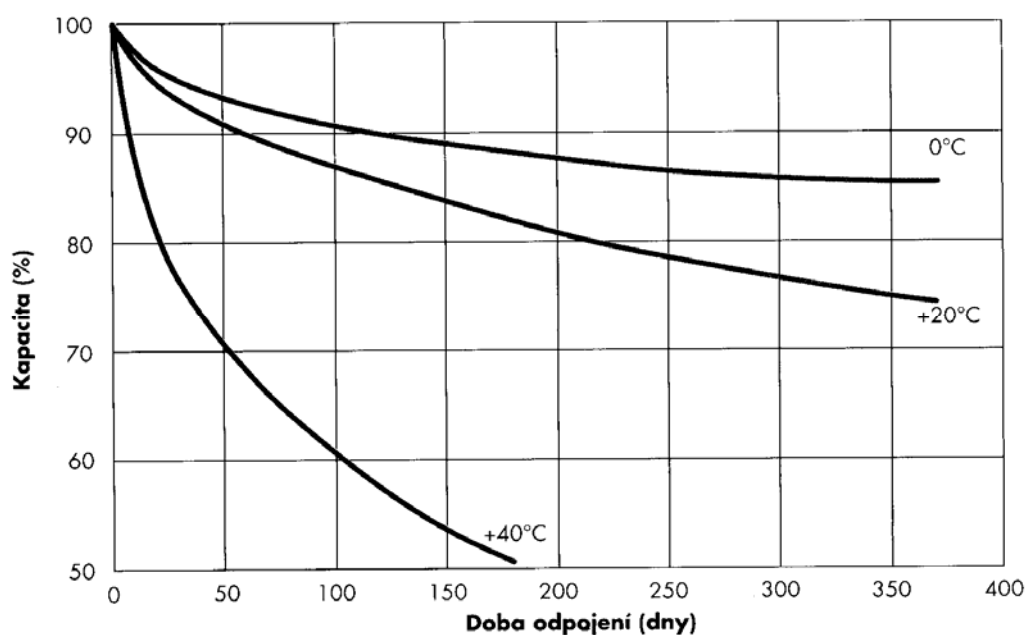
Změny teploty ovlivňují výkonnost článku, k čemuž musí být přihlédnuto při navrhování baterie. Provoz při nízkých teplotách výkonnost snižuje, zatímco charakteristiky pro vyšší teploty jsou bližší charakteristikám při normální teplotě. Vliv nízké teploty je patrnější při vyšším stupni vybití. Koeficienty snížení výkonnosti, které mají při dimenzování baterie kompenzovat teplotní výkyvy, jsou graficky znázorněny na obr. 1.3 při provozních teplotách mezi 30 °C a +50 °C.



Obr. 1. 3 Snížení výkonnosti článku v závislosti na teplotě a režimu vybíjení

### Ztráta kapacity samovybíjením

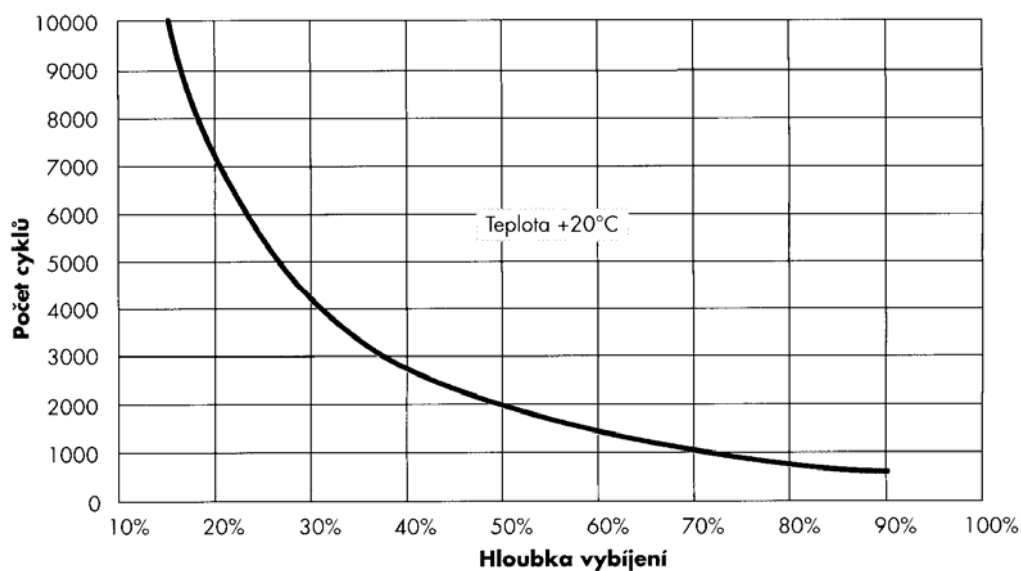
Stav nabití článku při odpojení obvodu se časem pomalu snižuje v důsledku samovybíjení. Ve skutečnosti je tento úbytek v prvních dvou týdnech relativně rychlý, avšak poté se stabilizuje na cca 2 % měsíčně při 20 °C. Charakteristiky samovybíjení nikl-kadmiového článku závisí na teplotě. Při nízkých teplotách je úbytek náboje nižší než při normální teplotě, a tedy i ztráty při odpojení obvodu jsou nižší. Při vyšších teplotách se však samovybíjení významně zvyšuje. Typické ztráty při odpojení obvodu pro nikl-kadmiový článek s lisovanými deskami při běžných teplotách znázorňuje obr. 1.4.



Obr. 1. 4. Úbytek kapacity NiCd článku při skladování

### Cyklování

Baterie jsou většinou navrženy tak, aby snesly širokou škálu typů cyklů vyskytujících se při různých aplikacích. To zahrnuje velmi malé vybití až k vybití na 100 %, přičemž počet cyklů, které výrobek může poskytnout, závisí na hloubce vybití v jednotlivých cyklech. Čím je hloubka vybíjení cyklované baterie nižší, tím více cyklů může baterie poskytnout v rámci



Obr. 1. 5 Typická životnost NiCd článků v závislosti na hloubce vybíjení

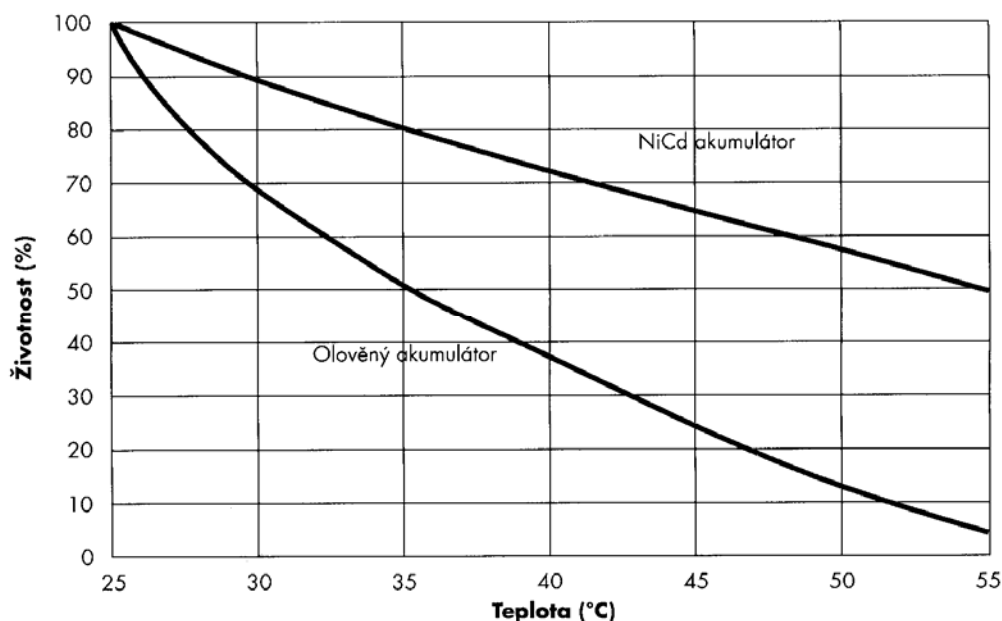
své životnosti. Baterie jsou schopny poskytnout až několik tisíc cyklů s mělkým vybíjením, zatímco cyklů s hlubokým vybíjením poskytují jen několik stovek. Obr. 1.5 udává typické hodnoty vlivu hloubky vybití na množství možných cyklů. Je zřejmé, že při dimenzování



baterie pro aplikaci s cykly má počet a hloubka cyklů značný vliv na předpověď, životnosti systému. Významnou výhodou niklo-kadmiových baterií ve srovnání s olověnými je fakt, že je lze úplně vybit, aniž by to negativně ovlivňovalo životnost nebo možnost dalšího nabíjení, pokud to neopakujeme v cyklech.

### Vliv teploty na životnost

Projektovaná životnost současných baterií je 20 let, ale stejně jako u jiných bateriových systémů, dochází při zvýšené teplotě ke snižování očekávané životnosti. Snižování životnosti v závislosti na zvýšené teplotě je však u niklo-kadmiových baterií mnohem méně výrazné než u baterií olověných. Snižování životnosti niklo-kadmiové baterie ve srovnání s vysoce kvalitní olověnou baterií znázorňuje obr. 1.6. Hodnoty pro olověnou baterii pocházejí z průmyslových zdrojů a jsou k nalezení v dokumentech Eurobat a IEEE. Všeobecně platí, že každým zvýšením teploty o 10 °C nad normální provozní teplotu 25 °C se životnost niklo-kadmiové baterie sníží o 20 % a životnost olověné baterie o 50 %. Při dimenzování niklo-kadmiové baterie je tedy nutné zvlášť zvažovat aplikace při vysokých teplotách. Za stejných podmínek však olověná baterie není řešením vzhledem k její velmi krátké životnosti.



Obr. 1. 6. Vliv teploty na životnost akumulátorů

### Spotřeba vody a vyvíjení plynů

Při nabíjení je baterii dodáváno více ampérhodin než je její kapacita pro vybití. Těchto nadbytečných ampérhodin je potřeba k dobití baterie do plného stavu. Ne všechny si však článku udržují, a ne všechny se podílejí na chemických změnách aktivních látek. Toto přebytečné nabití, neboli přebití, rozkládá vodu obsaženou v elektrolytu na kyslík a vodík, a proto je třeba tuto ztrátu nahradit doplňováním čisté destilované nebo demineralizované vody. Množství elektrolytu je nutno periodicky kontrolovat

Úbytek vody je spojen s proudem použitým při přebíjení. Baterie, která neustále prochází cykly, tj. je pravidelně nabíjena a vybíjena, tedy spotřebuje více vody než baterie v pohotovostním režimu. Teoreticky lze množství použité vody zjistit z Faradayovy rovnice, podle níž každá ampérhodina přebíjení rozloží 0,366 cm<sup>3</sup> vody. V praxi však bude spotřeba

vody nižší, protože přebíjející proud je spotřebováván také na překonání samovybití elektrod. Přebíjející proud je funkcí napětí a teploty, takže obě veličiny mají vliv na spotřebu vody.

Množství vyvíjených plynů závisí na množství vody rozložené elektrolýzou na vodík a kyslík. Plyny se začínají vyvíjet převážně až ke konci nabíjení. Při normálním vybíjení baterie žádné plyny nevznikají. Elektrolýzou  $1\text{cm}^3$  vody vznikne  $1\,865\text{cm}^3$  plyné směsi, která je tvořena ze  $2/3$  vodíkem a z  $1/3$  kyslíkem. Elektrolýzou  $1\text{cm}^3$  vody tedy vznikne zhruba  $1240\text{cm}^3$  vodíku.

Z tohoto důvodu je nutné zajistit větrání uzavřených místností nebo prostorů, kde jsou baterie umístěny. V poslední fázi vysokoúrovňového nabíjení baterie produkuje plynou směs vodíku a kyslíku. Ke zjištění adekvátní míry větrání místnosti je potřeba vypočítat množství vyvíjeného vodíku a ověřit, zda jeho koncentrace v místnosti je v bezpečných mezích. Obvyklý přijatelný limit koncentrace vodíku je 3,8 %. Některé normy však vyžadují přísnější limit koncentrace, někdy až 0,8 %.

K výpočtu nároků na větrání lze použít následující postup:  
 $1\text{ Ah}$  přebití rozloží  $0,366\text{cm}^3$  vody a  $1\text{cm}^3$  vody se rozloží na  $1,865\text{ l}$  plynu v poměru  $2/3$  vodíku a  $1/3$  kyslíku. Jedna Ah přebití tedy vyprodukuje  $0,45\text{ l}$  vodíku. Proto je objem vodíku vyvinutého v baterii za hodinu roven:  
 počet článků x nabíjecí proud x  $0,45\text{ l}$  nebo  
 počet článků x nabíjecí proud x  $0,00045\text{m}^3$ .  
 Objem vodíku zjištěný tímto výpočtem se dá vyjádřit jako procentuální podíl objemu místnosti s baterií a umožňuje tak zjistit počet výměn vzduchu nezbytný k udržení koncentrace vodíku pod určitou mezí.

### Nabíjení akumulátorů

Baterie lze nabíjet všemi obvyklými metodami. Obecně se baterie nabíjejí konstantním napětím v paralelním zapojení s nabíječkou a zátěží. V případech, kdy je baterie nabíjena odděleně od zátěže, je možné nabíjení stálým nebo klesajícím proudem. Nabíjení vysokými hodnotami proudů nebo přebití baterii nepoškodí, ale nadbytečné nabíjení zvýší spotřebu vody.

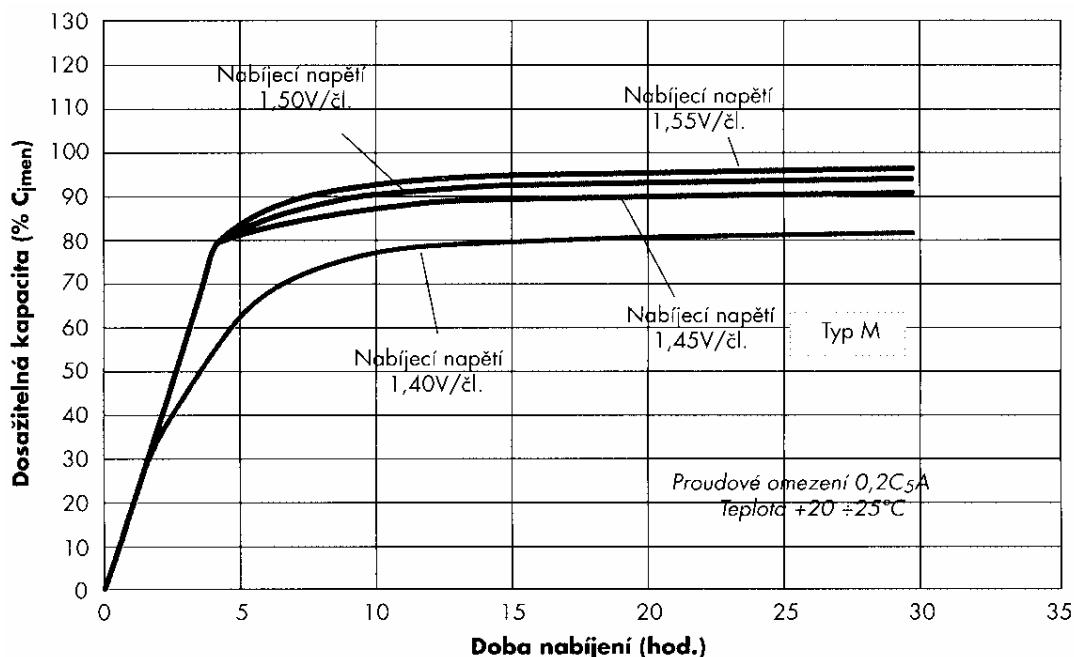
Baterie ve stabilních aplikacích se obvykle nabíjejí systémem s konstantním napětím. Existují dva typy těchto systémů: jedná se o dvoustupňové nabíjení, kdy počáteční konstantní nabíjecí napětí je vystřídáno nižším udržovacím napětím, nebo se jedná o typ s jednou úrovní napětí.

Hodnota nabíjecího napětí v systému s jednou úrovní nabíjecího napětí musí být kompromisem mezi napětím dost vysokým na to, aby nabíjení trvalo přijatelně dlouho, a dost nízkým na to, aby byla nízká spotřeba vody. Jedná se však jednodušší nabíjecí systém.

Dvoustupňový nabíječ pracuje v první fázi nabíjení s vyšším napětím, po které následuje fáze s nižším udržovacím napětím. To umožňuje dobíjet baterii rychle a přitom nespotřebovávat velké množství vody. Hodnoty nabíjecích a udržovacích napětí používaných pro jednotlivé typové řady baterií uvádí výrobce. Aby nedocházelo k vysoké spotřebě vody je vhodné použít nízkou hodnotu nabíjecího napětí článku. Běžně se tedy doporučuje použít minimální hodnotu napětí jako hodnotu jednoúrovňového a dvojúrovňového nabíjecího napětí.

Na obr. 1.7. je grafické znázornění dosažitelné kapacity v závislosti na nabíjení konstantním napětím ze stavu úplného vybití. Vybité baterii trvá určitou dobu, než dosáhne plného nabití. Jde o znázornění kapacity dosažené při typických nabíjecích napětí

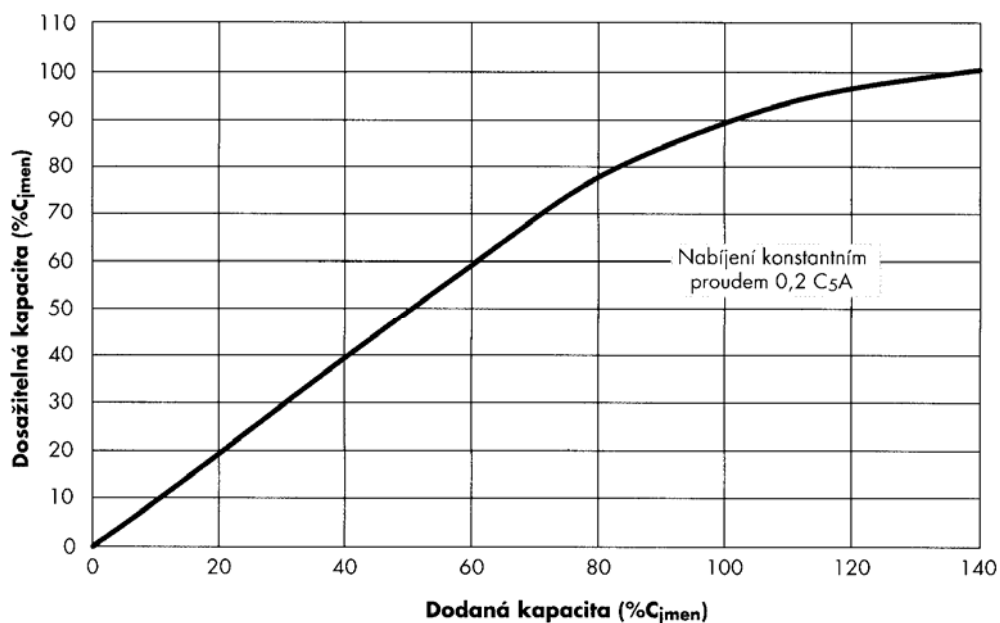
doporučovaných pro typ baterie s lisovanými deskami během prvních 30-ti hodin po úplném vybití.



Obr. 1.7. Dosažená kapacita v závislosti na době nabíjení konstantním napětím

### Účinnost nabíjení

Účinnost nabíjení baterie závisí na stavu nabití baterie a na teplotě. Ve většině rozsahu nabíjecího profilu probíhá nabíjení s vysokou účinností. Všeobecně platí, že při stavech nabití na méně než 80 % zůstává účinnost vysoká, avšak jakmile se baterie blíží stavu plného nabití, účinnost nabíjení klesá. Toto graficky ilustruje obr. 1.8.



Obr. 1.8. Dosažitelná kapacita jako funkce nabíjením dodaná kapacita  
Teplotní vlivy

Zvýšením teploty se zvýší aktivita elektrochemických pochodů. Při stejném udržovacím napětí se tedy nabíjecí (dobíjecí) proud zvýší. Při poklesu teploty dochází k opačnému pochodu. Proudový přírůstek způsobuje vyšší úbytek vody, při snížení proudu hrozí nedostatečné nabití článku. Je tedy výhodné udržovat nabíjecí proud na potřebné úrovni změnami udržovacího napětí podle změn teploty. Doporučená úprava napětí potřebná ke kompenzaci teploty je  $-3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ /článek, počínaje od teploty prostředí  $+20$  až  $+25$   $^{\circ}\text{C}$ .

### Počáteční nabíjení

Je vhodné, aby baterie byla poprvé nabita dobře. Tato operace se nedá opakovat, a proto je nezbytné baterii náležitě připravit na dlouhou službu. Toto je důležité i pro vybité a opakovaně naplněné články ve stavu úplného vybití. První nabití by mělo být uskutečněno konstantním proudem a mělo by článek dodat 300 % jeho nominální kapacity. Článek o kapacitě 250 Ah tedy spotřebuje při nabíjení 750 Ah, např. 50 ampérů během 15 hodin.

Články, které byly skladovány méně než jeden rok, by měly být před uvedením do provozu nabíjeny 15 hodin při doporučeném nabíjecím proudu.

Články, které byly skladovány déle než jeden rok, nebo byly dodány prázdné a naplněny, by měly být nabíjeny 15 hodin při doporučeném nabíjecím proudu, vybity na 1,0 V na článek a opakovaně nabíjeny 10 hodin při doporučeném nabíjecím proudu.

Pokud nelze zajistit nabíjení stálým proudem, je možno použít metodu nabíjení konstantním napětím s vyšší úrovní napětí. Např. napětí 1,65 V lze použít po dobu 20 - 30 hodin, pokud je proudové omezení přibližně rovné doporučenému nabíjecímu proudu. Je-li proudové omezení nižší, je potřeba odpovídajícím způsobem prodloužit dobu nabíjení. Po počátečním nabití může být baterie uvedena do provozu.

### Vybité a prázdné články

Vybité a prázdné články lze za dodržení vhodných podmínek skladovat po mnoho let. Články by měly být skladovány v čistém, suchém, chladném ( $+10$  až  $+30$   $^{\circ}\text{C}$ ) a dobře větraném prostoru v otevřených regálech. Je důležité, aby byly pevně utěsněny zátkami s přepravní fólií. Tu je potřeba kontrolovat alespoň jednou ročně a v případě potřeby vyměnit. Netěsnost způsobí pronikání kyslíčnicku uhličitého z atmosféry a následné usazování uhlíku na povrchu elektrod. To může nepříznivě ovlivnit kapacitu baterie. Skladování baterií při teplotách nad  $+30$   $^{\circ}\text{C}$  může vést ke ztrátě kapacity dosahující až 5 % za rok na každých 10  $^{\circ}\text{C}$  překračujících 30  $^{\circ}\text{C}$ . Vybité a prázdné články je potřeba naplnit elektrolytem a potom postupovat jako u plných článků skladovaných více než 1 rok.

### Olej v člancích

Na hladině elektrolytu v naplněných člancích pro speciální použití plave vrstva oleje, která zabraňuje samovybíjení a úbytku vody vypařováním. Tato vrstva je zhruba 5 mm silná. Pokud jsou články dodány prázdné, musí být po naplnění elektrolytem tato vrstva oleje vytvořena.

## 1. 5. Dostupné typy NiCd akumulátorů na trhu a jejich použití

Spektrum použití otevřených NiCd akumulátorů je velmi široké. Používají se na zdroje ke spouštěčům, na záložní palubní zdroje ve vlacích, na lodích, v letadlech, ve zdrojích UPS až po trakční baterie elektromobilů. Největší světový výrobci jsou francouzská firma SAFT, britská firma ALCAD a švédská firma NIFE. Akumulátorové články od těchto firem vynikají vysokou životností, malými rozměry a nízkou hmotností při vysokém dodávaném výkonu. Zaručovaná životnost článku určeného pro zálohovací systémy UPS je 20 let. Letecké baterie NiCd SAFT, které používá většina předních světových výrobců dopravních, vojenských i sportovních letadel jsou příkladem maximálního soustředění výkonu v minimálním objemu ( $1350 \text{ W/dm}^3$ ) při minimální dosahované hmotnosti ( $700 \text{ W/kg}$ ). Firma SAFT má asi 55 % podílu výroby na světovém trhu a v leteckých akumulátorech je to 62 %.

Alkalické akumulátory se vyráběly v České republice v mnoha různých provedeních a vzhledem k jejich dlouhé životnosti se s nimi ještě běžně setkáváme:

Uvedené označení akumulátorů bylo používáno u výrobků Pražské akumulátorky.

- dopravní niklo-kadmiové akumulátory (články i baterie), označení NTK;
- napájecí niklo-kadmiové akumulátory pro sdělovací zařízení (v kovových nádobách NTK, v nádobách z plastických hmot NKNU);
- osvětlovací niklo-kadmiové akumulátory pro kolejová vozidla (NKO);
- niklo-kadmiové akumulátory pro velké proudy, tj. ke spouštění motorů diesel-elektrických lokomotiv a jiných zařízení, vyžadující velké proudy; akumulátory se vyznačují sníženým vnitřním odporem (NKS);
- důlní niklo-kadmiové akumulátory k napájení přenosných svítilen v dolech (NKDU)

V současnosti jsou dostupné moderní akumulátory od společnosti **Saft-Ferak, a.s.** a lze je rozdělit do čtyřech skupin:

### Typ KPH (H) (krátký režim vybíjení),

Niklo-kadmiové baterie a akumulátory pro krátký režim vybíjení jsou určeny pro účely, kde je požadován vysoký odběr proudu v krátkých časových periodách, obvykle méně než 30 min. Mají kapacitu od 15 Ah do 280 Ah.

Používají se především jako zdroj energie ke startování:

- spalovacích motorů a diesel-elektrických agregátů,
- napájení spotřebičů diesel-elektrických lokomotiv,
- pro napájení elektrických systémů tramvají, osvětlení,
- elektromagnetické brzdy, otevírání dveří
- pro další elektrosystémy, kde je potřeba krátkých, velmi velkých odběrových proudů

### Typ KPM (M) (střední režim vybíjení)

Baterie pro střední režim vybíjení jsou konstruovány pro účely, kde je obvykle potřeba udržovat odběry proudu od 30 min. do 3 hod. a nebo pro smíšené odběry, které vyžadují kombinace vysokých a nízkých vybíjecích režimů. Mají kapacitu podle typu od 18 Ah do 375 Ah.

Tento typ je určen pro napájení:

- plošinových vozíků
- brzdových systémů
- elektrických hodin
- zabezpečovacích a signalizačních zařízení

- osvětlovacích lamp na operačních sálech
- osvětlení železničních vozů a lokomotiv

### **TYP KPL (L)** (dlouhý režim vybíjení a staniční použití)

Niklokadmiové akumulátory typové řady L se používají tam, kde je potřeba zajistit spolehlivý zdroj energie na poměrně dlouhé časové intervaly. Obvykle je odběr proudu relativně nízký vzhledem k celkové kapacitě. Mají kapacitu podle typu od 11Ah až 160Ah.

Jsou určeny jako napájecí zdroj pro:

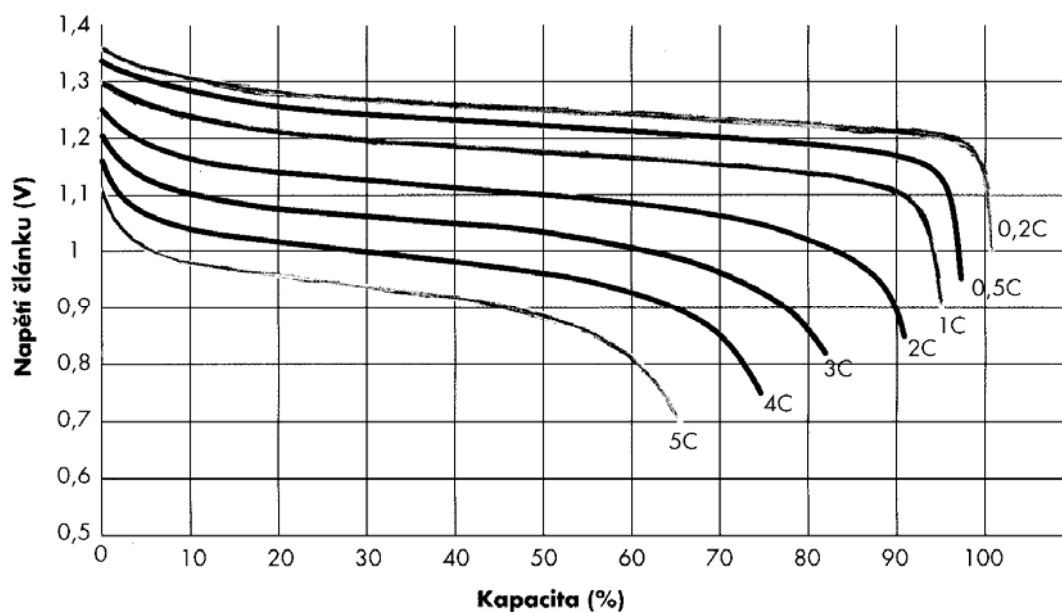
- stabilní i přenosná osvětlovací zařízení
- signalizační zařízení
- speciální přístroje
- telekomunikační zařízení
- nouzové osvětlení budov

### **Baterie pro speciální použití**

Tento typ se používá pro napájení:

- důlních svídel
- lamp pro speciální vojenské účely

Pro představu uvádím na obr. 1. 9 vybíjecí křivky plně nabitého NiCd článku z řady KPH při teplotě 20°C.



Obr. 1. 9. Typické vybíjecí křivky článků typu KPH při 20°C

## 2. Uzavřené sekundární články NiCd

### 2.1. Standardní nabíjecí články

Je nutno upozornit na to, že niklokadmiové články obsahují značné množství kadmia (asi 20% celkové hmotnosti článku), které tvoří zápornou elektrodu, jsou silně toxické. Proto je snaha tyto články posléze alespoň částečně nahradit akumulátory Ni MH, které jsou z ekologického hlediska téměř nezávadné, ale mají vyšší cenu. Zdá se však, že příznivé vlastnosti jak Ni MH, tak NiCd jsou natolik vyvážené, že povedou i v budoucnu k jejich koexistenci obou druhů na trhu baterií. V aplikacích, v nichž vlastnosti standardních článků nevystačí, lze použít nabíjecí články pro zvláštní použití.

Články se zvětšenou kapacitou a pro velké proudy - jsou určeny do zařízení pro nejvyšší nároky, obvykle miniaturizovaných. Mají kapacitu až o 40% vyšší, než standardní články. V současné době se očekává ukončení vývoje článků s kapacitou až o 60% větší. Je to dosaženo použitím velmi čistého materiálu pro výrobu elektrod a navíc záporná elektroda má zvýšené množství kadmia. Firma Varta označuje tyto články kódem **RSE**. Obdobné vlastnosti - s ohledem na dosažení co největšího zatížení mají články pro velké proudy označované kódem **RSH**. Na českém trhu jsou to akumulátory francouzské firmy SAFT, jejich distribuci zajišťuje Bateria Slaný (PALABA a. s.) a označení mají **VE** a **VSE**. Od firmy SANYO - CADNICA jsou s kódem **E**.

Články pro vysoké teploty - tento druh článků NiCd lze používat v rozsahu teplot od -20°C do +65°C. Uplatní se zejména ve všech zařízeních, pracujících při zvýšené teplotě a v lékařských přístrojích. Umožňují pomalé nabíjení (trickle) za zvýšené teploty 40 až 45°C. Mají však větší vnitřní odpor. Elektrody těchto článků bylo nutno zdokonalit a zlepšit teplotní odolnost všech částí, zejména separátoru. Označují se **RST** firmou VARTA, od firmy SAFT mají označení **VT** a firma CADNICA je uvádí pod kódem **H**.

Články pro rychlé nabíjení - název napovídá, že tyto články jsou vhodné k použití v případech, kdy musí být znovu nabity v co nejkratším čase - od jedné hodiny do několika minut. Nabíjecí proudy se pohybují až na 4CA a nabíjení nutně vyžaduje kontrolu metodou přírůstku  $\Delta U/\Delta t$  nebo  $\Delta U/\Delta T$ . Výrobci zlepšili především absorpční vlastnosti záporné elektrody pojmout co nejvíce kyslíku nebo vodíku ke konci nabíjení. Tím se snížil tlak uvnitř článků na únosnou míru. U výrobků Varta je tato řada označena kódem **RSQ**, firma CADNICA je označuje kódem **R**.

Články pro zálohované napájení elektronických systémů - používají se v počítačových obvodech, kde je nutno při výpadku hlavních napájecích obvodů udržet informaci ve vnitřních pamětech RAM nebo v některých měřicích přístrojích. Při konstrukci těchto článků je věnována velká pozornost čistotě použitých materiálů na elektrody a zejména na separátor, aby se ta zmenšil samovybíjecí proud. V současné době jsou na některých místech nahrazovány lithiovými články (např. základní počítačové desky pro zálohování CMOS).

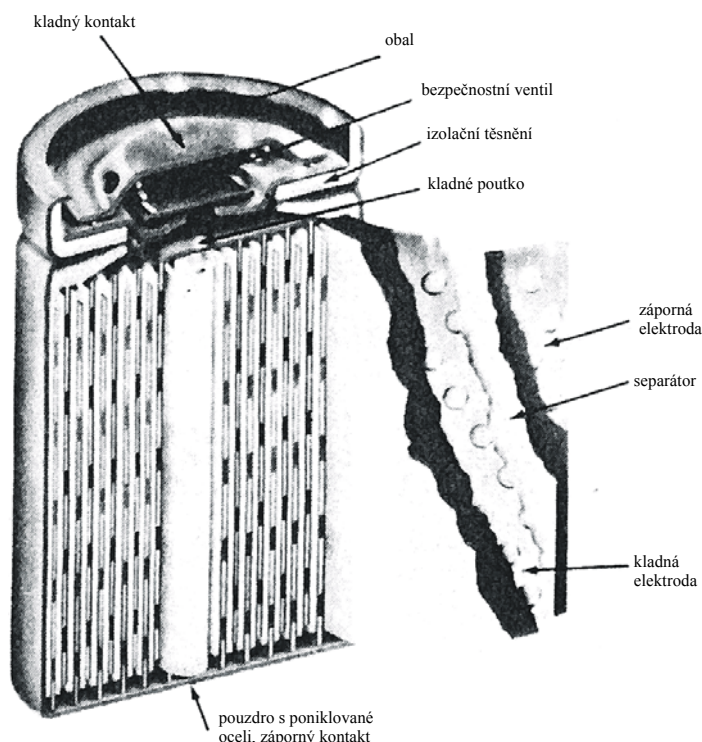
### 2.2. Konstrukce článků

Článek je elektrochemický systém, který je tvořen elektrodami a alkalickým elektrolytem, uzavřenými v pouzdru. Kladná i záporná elektroda mají vysoce porézní strukturu a velký povrch, aby bylo dosaženo malého vnitřního odporu. Kladnou elektrodou je

plstěný vysoce porézní niklový substrát (hydroxid niklu) do kterého jsou vloženy další niklové přísady. Záporná elektroda je děrovaná poniklovaná ocelová fólie, pokrytá aktivním materiálem kadmia (NiCd článěk) nebo slitinou kovu s vodíkem (NiMH článěk) tzv. metalhydridem. Obě elektrody jsou od sebe izolovány separátorem a ponořeny do alkalického elektrolytu.

### 2. 2. 1. Válcové uspořádání článku

Válcové uspořádání je nakresleno na obr. 2.1. Elektrody jsou odděleny separátorem, kterým je netkaný syntetický materiál, (např. laminovaný porézní nylon). Tloušťka separátoru je pouze několik desetin milimetrů. Separátor slouží jako izolátor mezi kladnou a zápornou elektrodou a také jako prostředek pro absorpci elektrolytu.



Obr. 2.1 Konstrukce válcového článku NiCd

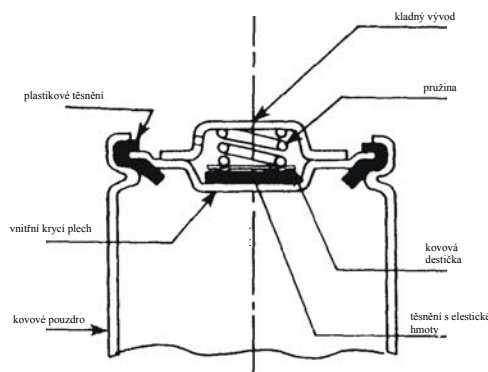
Elektrody jsou stočeny do spirály a vloženy do válcového pouzdra z poniklované oceli tak, že záporná elektroda je v elektrickém kontaktu s pouzdrem. Z hlediska jednoduchosti výroby je válcový tvar nejvýhodnější.

Pouzdro je naplněno přesně stanoveným množstvím alkalického elektrolytu. Množství musí být dostatečné k navlhčení elektrod i separátoru a přitom musí ponechat místo pro vývin kyslíku při přebíjení. Alkalický elektrolyt je nasáklý v aktivní hmotě elektrod a pórech separátoru. V článku není žádný tekutý elektrolyt. Elektrody jsou v alkalickém roztoku elektrolytu nerozpustné ve kterékoli fázi pracovního cyklu. Protože chemické reakce nepůsobí úbytek aktivní hmoty elektrod, je životnost článku relativně vysoká. Kladná elektroda je spojena s kovovým víčkem pomocí poutka.

Systém elektrod se separátorem, nasáklý elektrolytem, je uzavřen v poniklovaném pouzdru, jež současně tvoří záporný pól článku. Kladný pól ve tvaru ocelové poniklované čepičky je v horní části článku, který obvykle příkryvá pojistný ventil.



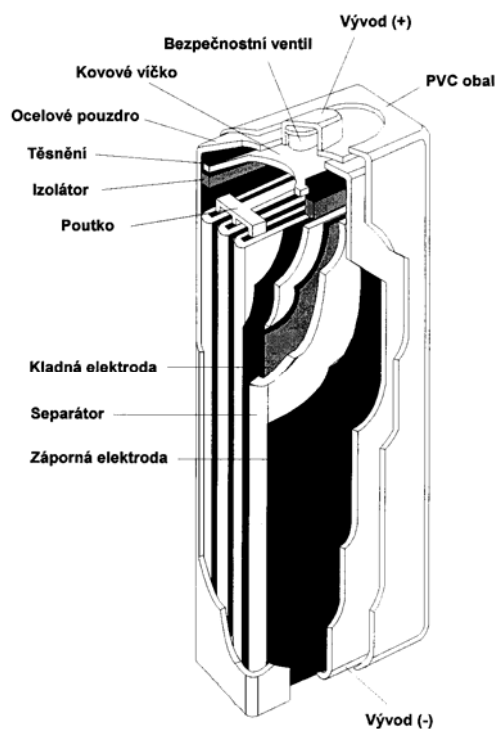
Článek je uzavřen přimáčknutím horní části článku k pouzdru. Horní část obsahuje bezpečnostní ventil, kovové víčko a plastické těsnění. Kovový válec je obalen PVC fólií. Ventil uvolní jakýkoliv nadměrný tlak, který by mohl způsobit výbuch baterie. Konstrukce ventilu je patrná z obr. 2.2. Tyto ventily jsou navrženy tak, aby odolávaly tlaku asi do 1,5Mpa. Dlouho trvající velký nabíjecí nebo vybíjecí proud způsobí nepřiměřený růst teploty (až do 80°C) a současně vyvíjí takové množství kyslíku a vodíku, které se nestačí na elektrodě absorbovat, tzn. Nárůst vnitřního tlaku. Správně navržený článek se nesmí otevřít na jiném místě, než je pojistný ventil



Obr. 2. 2 Konstrukce bezpečnostního ventilu uzavřeného článku

### 2. 2. 2. Hranolové uspořádání článku (SLIM)

Základní rozdíl mezi hranolovým a válcovým uspořádáním je v konstrukci elektrod a v odlišném tvaru pouzdra. Hranolové články jsou navrženy pro zařízení, kde je omezen prostor



Obr. 2. 3. Konstrukce hranolového článku (SLIM)

pro baterie. Pravoúhlý tvar hranolového článku umožňuje lepší využití vnitřního prostoru, protože odstraňuje volná místa, která se vyskytují u válcových článků. Hranolové články tedy mohou dosáhnout vyšší objemovou hustotu energie než válcové články. Obr. 2. 3 ukazuje strukturu hranolového článku.

Elektrody jsou vyrobeny obdobným způsobem jako u válcového článku, ale výsledné elektrody mají rovný a pravoúhlý tvar. Kladné a záporné elektrody jsou proloženy separátorovými deskami. Tento celek je vložen do poniklovaného ocelového pouzdra a je pak přidán elektrolyt. Kladné elektrody jsou spojeny s kovovým víčkem prostřednictvím poutka. Článek je uzavřen přimáčknutím horní části k pouzdru. Horní část je obdobná jako u válcového uspořádání a obsahuje bezpečnostní ventil, kovové víčko a plastické těsnění. Kovové hranolové pouzdro je pak obaleno PVC fólií.

### 2. 3. Chemické procesy v NiCd článcích

Ačkoliv detailní chování článků se může lišit, základní chemické procesy zůstávají stejné. NiCd článek je elektrochemický systém, ve kterém aktivní materiály mění oxidační stav bez fyzické degradace. Tyto aktivní materiály jsou přítomné v pevné formě, která je nerozpustná v alkalickém elektrolytu.

Na rozdíl od jiných systémů, NiCd články při nabíjecích-vybíjecích reakcích nevyžadují přenos materiálu z jedné elektrody na druhou. Elektrody mají také dlouhou životnost, protože aktivní materiály v nich obsažené nejsou spotřebovávány během provozu nebo uskladnění.

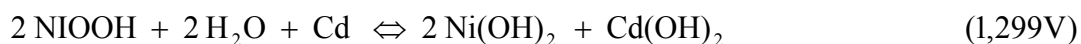
V NiCd článku je aktivním materiálem na kladné elektrodě hydroxid oxidu nikelnatého (NiOOH). Při vybíjení je redukován na Ni(OH)<sub>2</sub> přijímáním elektronů z vnějšího obvodu:



Kadmiový kov je aktivním materiálem na nabitě záporné elektrodě. Během vybíjení oxiduje na hydroxid kademnatý Cd(OH)<sub>2</sub> a uvolňuje elektrony do vnějšího obvodu:



Tyto reakce se obrátí při nabíjení článku. Výsledná reakce probíhající v elektrolytu hydroxidu draselného (KOH):



#### 2. 3. 1. Chemické procesy v uzavřených článcích

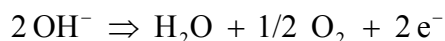
Uzavřené články pracují v uzavřeném systému, který rekombinuje plyny vzniklé v článku. Rekombinace rovněž snižuje ztráty elektrolytu, vznikající v otevřených článcích. Dodržení tří základních kritérií je nezbytné pro správnou rekombinaci:

**I)** Efektivní kapacita záporné elektrody musí být větší než kapacita kladné elektrody, tzn. Že záporná elektroda musí obsahovat více aktivního materiálu než kladná elektroda. Tato konstrukce způsobí, že kladná elektroda dosáhne plného stavu nabití dříve než záporná

elektroda. Na záporné elektrodě by se jinak začal produkovat vodík, který nemůže tak snadno rekombinovat.

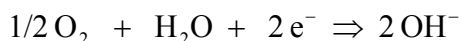
2) Elektrolyt musí být rovnoměrně rozdělen separátorem tvořícím tenký film na ploše obou elektrod. Elektrolyt uvnitř článku musí pouze navlhčit plochy elektrod a zbytek musí být absorbován v separátoru. Elektrody nejsou ponořeny do elektrolytické lázně jako je tomu u článků s tekutým elektrolytem.

3) V separátoru a okolo elektrolytu musí být dostatečný volný prostor, aby mohl kyslík účinně difundovat z kladné na zápornou elektrodu. Během nabíjení dosáhne kladná elektroda plného nabití dříve než záporná a odstartuje se vývin kyslíku:



Kyslík rychle difunduje separátorem na zápornou elektrodu.

U NiCd článků na záporné elektrodě kyslík redukuje zpátky na ionty hydroxidu:



Hydroxidové ionty dokončují okruh migrací zpátky na kladnou elektrodu.

U NiMH článků reaguje kyslík na záporné elektrodě s metal hydridem a oxiduje nebo vybije metal hydrid přičemž dojde k produkci vody:



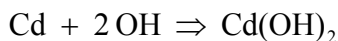
Tlak kyslíku se na počátku přebíjení zvyšuje, ale pak dojde k ustálení na nízkém rovnovážném tlaku, který je dán typem článku, teplotou okolí a velikostí proudu. V tomto rovnovážném stavu vznikající kyslík rekombinuje na záporné elektrodě a záporná elektroda nedosáhne plného stavu nabití a proto nedojde k vývinu vodíku. Záporná elektroda je v porovnání s kladnou předdimenzovaná tak, aby měla větší kapacitu, než odpovídá kapacitě článku a může proto pohltit zvýšené množství kyslíku, které při přebíjení na konci nabíjecího procesu vzniká na kladné elektrodě.

Rekombinace kyslíku umožňuje trvalé přebíjení uzavřených článků stanovenou velikostí proudu, aniž by došlo k nadměrnému nárůstu tlaku. Dovolená velikost přebíjecího proudu je dána typem článku, např. pro NiMH články firma Duracell® doporučuje omezit proud při přebíjení na C/300. Je nutné si uvědomit, že při rekombinaci kyslíku vzniká teplo, které musí být vyzářeno do okolí.

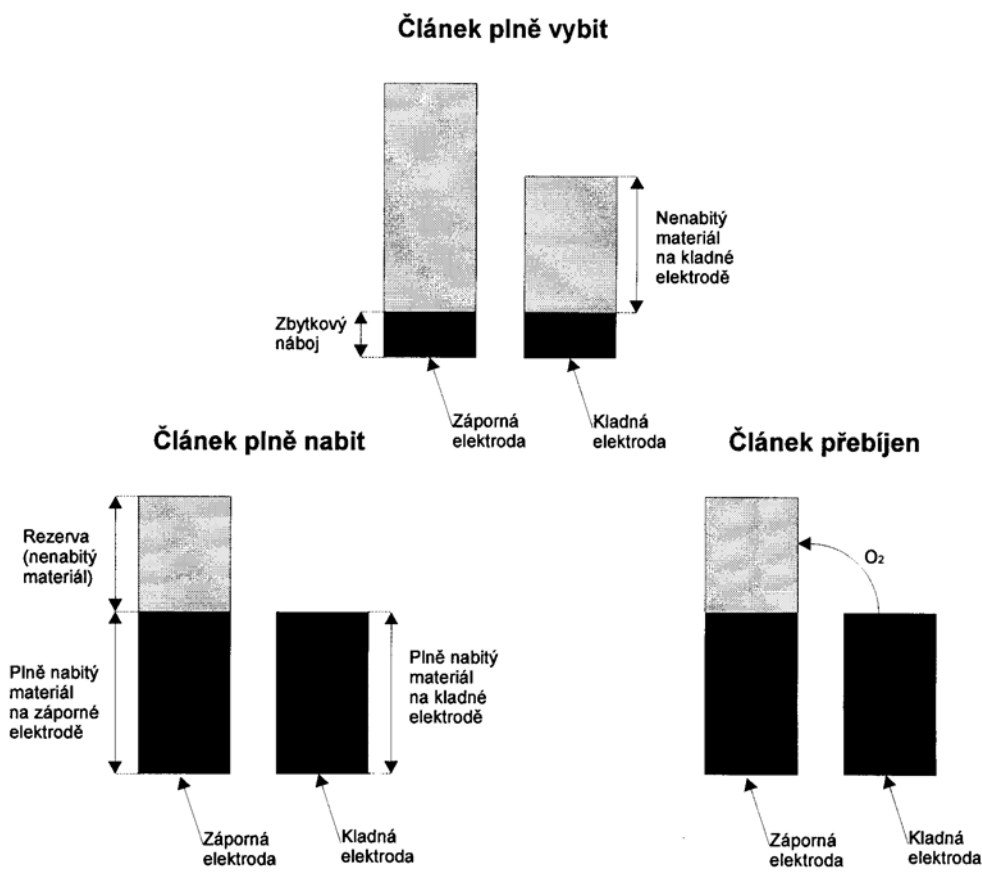
Uvolňování vodíku ze záporné elektrody při přebíjení je zabráněno velkou schopností této elektrody vodík absorbovat. Určitou rezervou je použití většího množství hydroxidu kadmického  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ . Reakci pohlcování kyslíku na záporné elektrodě při zrychleném nabíjení nebo přebíjení popisuje rovnice:



Další rezervou záporné elektrody je zvýšené množství kadmia. Umožňuje vybijet články velkými proudy ( $>1\text{CA}$ ), při kterých se nadbytečně okyslíčí na hydroxid kadmia:



Poškození článku neúmyslnou změnou polarity se zabráňuje přidáním depolarizátoru do hmoty kladné elektrody. K přepólování může dojít, protéká-li úplně vybitým článkem vybíjecí proud ostatních článků, se kterými je spojen do série. Depolarizační hmotou bývá hydroxid kademnatý. Při přepólování pohlcuje depolarizátor  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  na anodě kyslík, uvolňovaný tentokrát z katody. Hydroxid kademnatý se přitom redukuje na kadmium. Depolarizátor pracuje účinně pouze při menších reversních proudech - zhruba do 0,1CA - a po dobu nejvýše dvě až tři hodiny. Toto období je ovšem poslední etapou života těžce zkoušeného článku. Plyny, vznikající při provozu článku, pohltní záporná elektroda a částečně (při reversaci proudu) i hmota depolarizátoru v anodě. Proto lze články konstruovat zcela těsné.



Obr. 2.4 Situace na elektrodách při různých stavech nabití

## 2. 4. Paměťový jev

"Článkem" budeme nazývat jedno 1,2V zařízení. "Baterie" je zařízení složené z jednoho nebo více článků do série nebo paralelně, dávající násobek 1,2 voltů nebo násobek proudu.

Není bezpečné úplně vybit baterii NiCd článků. Příčinou je, že jeden ze článků tvořících baterii se vyčerpá dříve a ostatní "živé" články udržují vybíjecí proud skrze vyčerpaný článek. Toto vede ke stavu známému jako "overdischarge". Zdravé NiCd články mají celkem plochou vybíjecí křivku. Dodávají napětí velmi blízké 1,2V na článek, dokud většina jejich náboje není vyčerpána. Pak u nich velmi rychle poklesne napětí. Napětí na článku poklesne na 1,1 V v době, kdy už článku zbývá pouze několik procent náboje. Firma Gates uvádí, že baterie by měla být považována za vybitou když je dosaženo této napěťové

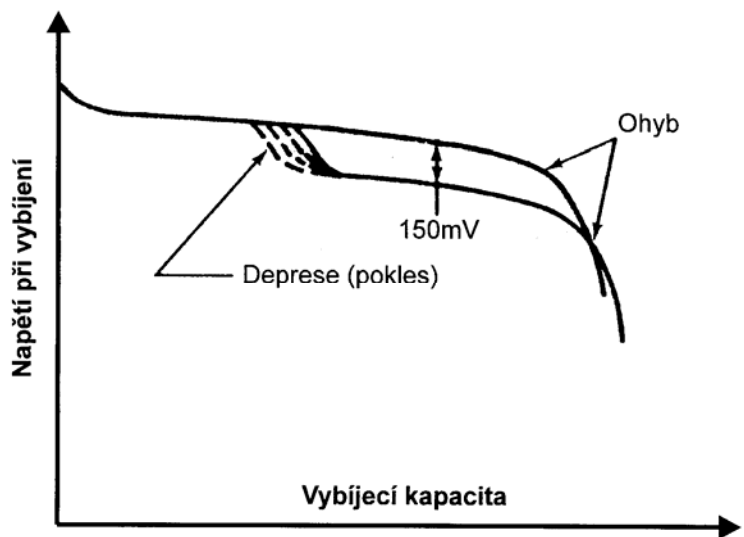
úrovně. Odůvodňuje to faktem, že malé množství zůstatkového náboje nemůže být bezpečně odebráno, bez rizika jevu "overdischarge" a následného poškození článku.

Proto většina dobře vyrobených notebooků a kamer obsahuje power management hardware, který sleduje napětí na baterii. Když napětí klesne na 1,1V na článek, prohlásí systém baterii za vybitou a vypne zařízení.

"Paměťový efekt", který může omezovat kapacitu NiCd baterie nastává pouze v případě, že je baterie opakovaně a mnohokrát za sebou vybita přesně na stejnou úroveň vybití, a opětovně plně nabíjena. Gates uvádí, že paměťový efekt téměř nebyl v praxi zaznamenán, protože se vyskytuje jen když je částečné vybití přesně mnohokrát v řadě za sebou. Speciálně termín "paměť" pochází z aplikace NiCd baterií v leteckém průmyslu, ve kterém byly články opakovaně vybity na 25% jejich využitelné kapacity ( $\pm 1\%$ ) pod přísným počítačovým řízením a pak znovu nabity na 100% kapacity, bez přebíjení. Dlouhodobé opakované cykly bez přebíjení způsobily ztrátu kapacity kolem 25%.

Existuje však jev, který může napodobovat paměťový efekt, který snímač stavu baterie může vyhodnotit jako ztrátu kapacity. Tento jev je nazýván "napětíová deprese" a nastává v případě, že je baterie přebíjena. Výstupní napětí baterie poklesne v určité části vybití cyklu z 1,2V na asi 1,05V (viz obr. 2.5) a tento pokles může poplést monitorovací obvod a baterie je chybně pokládána za vyčerpanou.

Napětíovou depresi je možno odstranit. Může být vyléčena úplným vybitím každého článku tvořícího baterii a pak opětovným nabitím. Tento postup je možné praktikovat jen pokud konstrukční provedení baterie umožňuje přístup k jednotlivým článkům. Pokud nemáme přístup na jednotlivé články, musíme zvolit jiný alternativní postup. Baterie je vybita do té doby, dokud na ní napětí neklesne na 1,0V na článek a pak ji znovu nabijeme. Úplné vybití baterie do nuly by s velkou pravděpodobností vedlo k poškození baterie v důsledku "overdischarge". Napětíová úroveň 1,0V je ještě relativně bezpečná a umožňuje, aby se všechny články vybity pod bod napětíové deprese.



Obr. 2. 5 Vliv dlouhodobého přebíjení (napětíová deprese)

Přebíjení baterie se můžeme vyhnout včasným odpojením baterie z nabíječe. Jestliže je potřeba udržovat NiCd baterie neustále v úplném stavu nabití, měl by být použit inteligentní nabíječ, který se po plném nabití musí přepnout na udržovací režim. Udržovací režim zajistí trvalé nabíjení baterie proudem kolem  $C/100$  a zajišťuje kompenzaci samovybití baterie.

Paměťový jev, zpozorovaný původně v letectví, byl odstraněn jednoduchým přeprogramováním počítačového řízení tak, aby bylo připuštěno přebíjení baterie. "Paměť" nemůže existovat, pokud trvá některý z následujících stavů:

- 1) baterie je přebíjena
- 2) úroveň vybíjení není přesně stejná v každém cyklu (plus nebo minus 2-3%)
- 3) napětí během vybíjení je menší než 1,0V na článek

Můžeme říci, že pravý paměťový jev se vyskytuje neobyčejně vzácně a postihuje jeden určitý druh baterií (sintrované NiCd články). Špatný výkon baterie, ze kterého je paměť obvykle obviňována, bývá zapříčiněn množstvím jednoduchých aplikačních problémů. Následuje seznam všech běžných aplikačních problémů nesprávně prisuzovaných paměťovému jevu:

1. Příliš vysoké vypínací napětí. Měření napětí k určení stavu vybití baterie může být záludné, protože NiCd baterie mají velmi plochou vybíjecí charakteristiku. Nevhodné párování článků s nepatrnou napěťovou depresí může zapříčinit, že mnoho výrobků označí baterii za vyčerpanou v době, kdy skoro celá kapacita zůstává použitelná (ačkoli s nepatrně sníženým napětím).
2. Vysoká okolní teplota, NiCd články trpí za stavu vysoké teploty. Takové prostředí snižuje jak náboj, který je přijat články, tak i napětí na baterii během nabíjení (což později vede k problému ad 1.).
3. Napěťová deprese díky dlouhodobému přebíjení. Napětí NiCd může poklesnout o 0,1 až 0,15V na článek, jestliže je vystaven dlouhodobému přebíjení. Přebíjení není neobvyklé, hlavně v ruce běžného spotřebitele, jestliže využívá nabíječ jednoduchého zapojení, který ale úmyslně poskytuje trvalý proud dostatečný pro relativně rychlé nabíjení. V takovém případě je nutné, aby se NiCd baterie nenabíjely déle než je doporučeno nebo použít inteligentní nabíječ s režimem pro dlouhodobé udržovací dobíjení.
4. Mnoho ostatních možných případů v různorodých kategoriích:
  - používání za teplot pod 0°C
  - vysoké vybíjecí proudy (nad 5C) v bateriích speciálně nekonstruovaných pro takové použití
  - nepřiměřená doba nabíjení nebo vadný nabíječ
  - jeden nebo více vadných článků (NiCd baterie mají konečnou životnost, nemohou pracovat navždy bez ohledu na to, jak s nimi zacházíme)

Ztráta kapacity kvůli dlouhodobému přebíjení je zapříčiněna ztrátou kontaktu částic hydroxidu kadmia se zápornou elektrodou. Obrázky z elektronového mikroskopu ukázaly, že přebíjení způsobuje zvětšování částic, zvláště za vysokých teplot. Toto snižuje stykovou plochu s póry záporné elektrody a tím se zvýší vnitřní odpor. Hluboké vybití vrátí částice hydroxidu na jejich původní malý rozměr a tím se zvětší styková plocha. Není nutné vybit baterii před každým nabíjením. Vybití baterie na 1V/článek udrží vytváření krystalů pod kontrolou. Přebíjení nastává, když je na záporné elektrodě přeměněn všechen hydroxid kadmia na kov kadmia. Jakmile k tomu dojde, začne se produkovat vodíkový plyn a teplo. Na kladné elektrodě se při přebíjení produkuje kyslík. Pokud trvá přebíjení mohou tyto plyny, zvláště vodík, nakonec uniknout z článku a tím snížit účinnost elektrolytu.

Problémem moderních NiCd článků tedy není paměť, ale zvětšování částic aktivních materiálů, tj. niklu a kadmia, jenž se vyskytují v NiCd baterii v krystalické formě. Při růstu částic se vytvářejí ostré jehličky a krystalky, které mohou v pokročilém stádiu prorazit separátor a tím způsobit vysoké samovybití nebo elektrický zkrat uvnitř článku. Proražený

separátor nemůže již být později opraven. Pro úplnost je nutno uvést, že byly prováděny pokusy o opravu takto zkratovaných článků. Zkrat se někdy podařilo odstranit vysokým proudovým pulsem, který přepálil kovové jehličky způsobující zkrat. Proudový impuls se obvykle vytvářel připojením kondenzátoru dostatečné kapacity nabitým na napětí asi 5V k NiCd článku. Tyto pokusy ale nevedly k trvalé nápravě a zkrat se po krátkém čase objevil znovu.

Pravý význam paměťového jevu se objevil při přesně opakovaných cyklech (bez přebíjení) NiCd článků se sintrovanými elektrodami, kdy se článek tváří, jakoby si pamatoval hloubku vybití. Efekt je mimořádně obtížné reprodukovat, zvláště u článku s kapacitou menší než 1Ah. V podrobném testovacím programu, speciálně určeném na způsobení "paměti", se jev neobjevil ani po 700 přesně řízených nabíjecích-vybíjecích cyklech. V programu byly použity články s kapacitou 1Ah. V následujícím programu byly použity články používané v letectví (s kapacitou 20Ah) a byly vystaveny podobnému testovacímu režimu. "Paměťový efekt" se dostavil po několika stech cyklech. Tento druh paměti se jeví být spojen s účinností kladné elektrody. Zdá se, že přesně opakované nabíjecí cykly ovlivňují schopnost plného nabití aktivních chemikálií v článku, po kterém kladná elektroda začne produkovat kyslík (jako kdyby byla přebíjena). Od té doby je možné, aby jak plyny, tak i nenabitě částice existovaly současně. Nezvyklé však je, že poté co je článek přebíjen, paměťový efekt nečekaně zmizí. Proto přebití ve skutečnosti odvrací pravý paměťový efekt.

Pozn. sintrovaná elektroda je elektroda vyrobená sintrováním (svařování bez tavení) jemného niklového prášku s povrchem plochy v množství kolem  $1\text{g}$  na  $\text{m}^2$ . Tím vznikne struktura podobná medové plástvi, ve které je kolem 80% volných pórů.

### 3. Uzavřené sekundární články NiMH

#### 3.1. Činnost a stavba NiMH článků

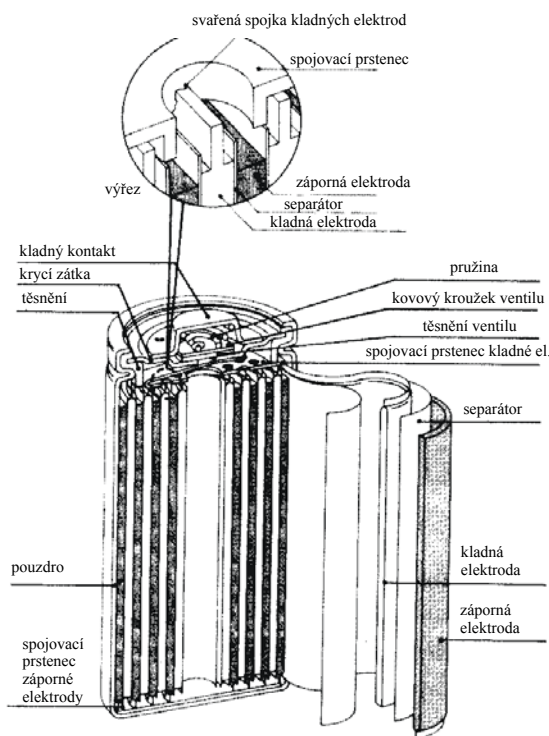
Konstrukce válcového (obr. 3.1) a hranatého článku je shodná s konstrukcí NiCd, stejně jako jsou podobné i některé další vlastnosti. Oba druhy těchto sekundárních článků jsou kompatibilní. V současné době se zaručuje u článků NiMH životnost 500 cyklů. Mohou pracovat v libovolné poloze, neboť systém elektrod s nasáklým elektrolytem vyplňuje celý prostor pouzdra článku. Pokud by NiMH pracoval v mezních podmínkách, je jištěn proti vnitřnímu přetlaku plynů pojistným ventilem.

Elektrody jsou nerozpustné v elektrolytu - hydroxidu draselném, který je nasáklý ve hmotě elektrod a separátoru. Separátorem je syntetický, plochý (nevlňný) velmi porézní materiál. Také u tohoto článku je záporná elektroda předimenzována a dokáže pohltit velké množství vodíku při vybíjení velkými proudy a kyslíku při přebíjení.

Aktivním materiálem na kladné nabitě elektrodě je, stejně jako u NiCd článku, hydroxid oxidu niklu ( $\text{NiOOH}$ ). Na záporné elektrodě je aktivním materiálem vodík ve formě metalhydridu. Je to sloučenina kov - vodík, kde kov je ve skutečnosti kovová slitina. Tato kovová slitina je schopná podrobit se vratným reakcím, při nichž dochází k pohlcování (absorbci) a uvolňování (desorbci) vodíku. Jedinečnou vlastností metalhydridové slitiny je její schopnost přijímat a vydávat svůj vlastní objem vodíkového plynu za tlaku menšího než je tlak atmosférický. Jako slitina se používá mnoho různých kovových sloučenin dělicích se typicky do dvou skupin:  $\text{AB}_5$  slitiny, jejichž představitelem je například  $\text{LaNi}_5$  a  $\text{AB}_2$  slitiny, zastoupené například  $\text{TiMn}_2$ , nebo  $\text{ZrMn}_2$ . Slitiny typu  $\text{AB}_5$  nabízejí větší odolnost proti korozi a tím i větší cyklickou životnost. Složení kovové slitiny je navrženo s důrazem na

optimální stabilitu a velký počet nabíjecích-vybíjecích cyklů. Mezi další důležité vlastnosti patří:

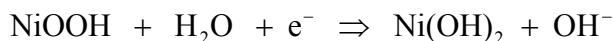
- velká kapacita pro uskladnění vodíku - pro vysokou hustotu energie a velkou kapacitu baterie
- příznivé kinetické vlastnosti - pro velké nabíjecí a vybíjecí proudy
- vysoká čistota materiálů - pro minimalizaci samovybíjení



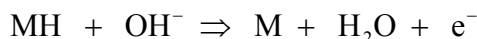
Obr. 3. 1. Konstrukce válcového článku NiMH

Hlavní součástí elektrolytu NiMH baterie je vodní roztok hydroxidu draselného (KOH). Pro uzavřené NiMH baterie je použito minimální množství elektrolytu, jenž je převážně absorbován separátorem a elektrodami. Toto ochuzení elektrolytem ulehčuje difuzi kyslíku do záporné elektrody před koncem vybíjení a při přebíjení.

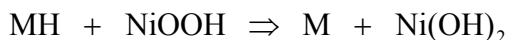
Při vybíjení NiMH baterie je na kladné elektrodě hydroxid oxidu niklu redukován na hydroxid nikelnatý (stejná reakce jako u NiCd baterie):



Na záporné elektrodě metal hydrid (MH) oxiduje na kovovou slitinu (M):



Celková reakce při vybíjení je následující:



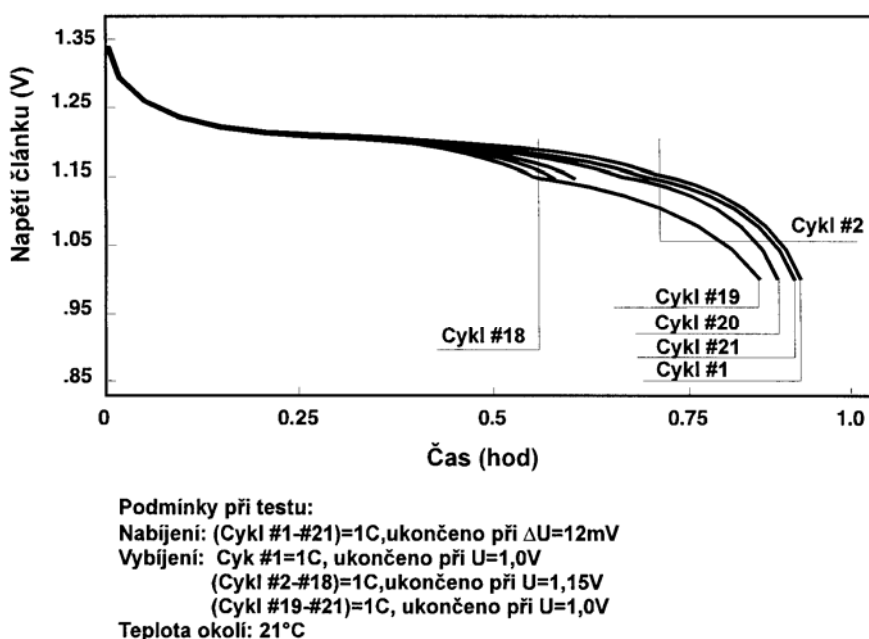
Na záporné elektrodě je produktem nabíjení kovový hydrid a po vybití je to poměrně složitá slitina. Při nabíjení NiMH baterie probíhají reakce opačným směrem.



### 3.2 Napět'ová deprese NiMH článku

Po velkém počtu cyklů nastává u NiMH baterie postupné snižování kapacity. Toto nevyhnutelné snížení kapacity může být urychleno přebíjením, skladováním, používáním za vysokých teplot nebo špatným párováním článků. Často je z krátké životnosti chybně obviňován paměťový jev. Paměťový jev je používán jako synonymum pro termín "napět'ová deprese". Napět'ová deprese je vědecky změřitelná vlastnost všech baterií, ačkoli NiCd baterie jsou k ní mimořádně náchylné.

Vratný pokles napětí a kapacity se může vyskytnout, když jsou NiMH baterie částečně vybíjeny a znovu nabíjeny opakovaně, bez potřebného plného vybití, jak ukazuje obr. 3.2. Po počátečním plném vybití (cykl #1) a nabití je článek částečně vybíjen na 1,15V a znovu nabíjen daný počet cyklů.



Obr. 3. 2 Vliv částečného vybíjení na kapacitu NiMH článku

Během těchto cyklů velmi pozvolna klesalo napětí a kapacita (cykl #2 až # 18). Po následném úplném vybití (cykl # 19) je vidět pokles napětí v porovnání s původním cyklem (cykl #1). Článek může být rychle navrácena plná kapacita po několika úplných cyklech nabíjení/vybíjení, jak naznačují cykly #20 a #21.

Dojde k poklesu napětí, protože pouze část aktivního materiálu v článku je vybita a znovu nabita během částečného vybíjení. Aktivní materiály, které neprošly cyklickou změnou zvýší svůj odpor. Následné úplné cykly nabíjení/vybíjení navrátí aktivní materiály do jejich původního stavu.

Velikost napět'ové deprese a úbytku kapacity závisí na hloubce vybití a můžeme se jim vyhnout vybíjením baterie na vhodné konečné napětí. Napět'ová deprese je nejvíce zřejmá, když je vybíjení přerušeno na vysokém konečném napětí, například 1,2V/článek. Menší napět'ová deprese nastává je-li vybíjení ukončeno na napětí 1,1 až 1,15V/článek. Vybíjení na 1V/článek by nemělo způsobovat podstatnou napět'ovou depresi nebo ztrátu kapacity. Správně navržené zařízení používající NiMH baterie minimalizuje efekt napět'ové deprese a úbytku kapacity. Firma DURACELL® například u svých NiMH baterií zaručuje, že úbytek kapacity při napět'ové depresi nepřekročí 5% kapacity baterie.

### 3.3. Porovnání vlastností NiCd a NiMH článků

Niklometalhydridové články byly uvedeny na trh teprve v roce 1990, zatímco niklokadmiové do dnešní doby prodělaly dvacetiletý vývoj, během něhož byly neustále zlepšovány. Zpočátku byly určeny NiCd téměř výhradně pro vojenské aplikace. Dnešní aplikace moderních elektronických systémů však vyžadují, aby byly dostupné široké veřejnosti. Lze říci, že niklometalhydridové články pokročily dnes ve svém vývoji tak daleko, jako byly články NiCd před patnácti lety. Výrobci oprávněně počítají s dalším zlepšováním NiMH článků ve všech směrech - technici mohou totiž využít všech poznatků, získaných při vývoji článků NiCd.

#### **Nesporné výhody oproti NiCd článkům:**

- mají malou napěťovou depresi, díky konstrukci záporné elektrody, vyrobené ze slitin kovů zachycujících vodík, jako jsou slitiny lanthanu (vyvinuté firmou Philips)
- poskytují o 30% až 40% větší kapacitu proti běžným NiCd článkům - vyžadují delší nabíjení
- jsou šetrné k životnímu prostředí, protože mají nízký obsah toxických kovů (Cd), obsahují jen 0,4% celkové hmotnosti narozdíl od NiCd kde je to přes 20%
- jsou méně citlivé na přebíjení
- jsou méně citlivé na teplotu, mohou pracovat ve větším rozsahu teplot, až do 60°C (NiCd max. do 45°C)

#### **Bohužel, NiMH zaostávají za NiCd články hned v několika pohledech:**

1. **Počet cyklů:** NiMH je stanoveno 400-700 cyklů nabíjení/vybíjení, v přímé spojitosti s hloubkou vybití. Pro srovnání NiCd mohou připouštět několik tisíc úplných vybíjecích/nabíjecích cyklů. Například výzkumné laboratoře firmy GE tvrdí, že některé testované NiCd baterie vydržely 30000 cyklů. NiCd baterie pro satelitní aplikace jsou navrženy s trvanlivostí 17 let.
2. **Možnost rychlého nabíjení:** NiMH baterie neumožňují tak rychlé nabíjení jako NiCd. Na rozdíl od NiCd, u NiMH nenastává pokles napětí při plném nabití pro spolehlivou detekci úplného nabití. Je tedy potřeba mnohem komplikovanější nabíjecí algoritmus v případě, že se při nabíjení nepoužije teplotní senzor. NiCd baterie lze nabíjet až 20min/4CA, NiMH baterie 1hod/4CA.
3. **Vybíjecí proud:** maximální povolený vybíjecí proud NiMH článku je podstatně nižší než u NiCd. Tento nedostatek nemusí být kritický v aplikacích vyžadujících malé zatížení jako jsou mobilní telefony. NiCd baterie lze vybíjet až 10CA, NiMH pouze asi 6CA.
4. **Vysoké samovybíjení:** NiMH i NiCd postihuje samovybíjení. NiCd ztratí kolem 10% za své kapacity během prvních 24h, po kterých se samovybíjení ustálí na asi 10% za měsíc. U NiMH je samovybíjení vyšší, protože dochází k úniku atomů vodíku.
5. **Kapacita:** NiMH články mají asi o 30-40% větší kapacitu oproti NiCd článkům stejných rozměrů. Toto porovnání platí pro standardní NiCd články. Byly vyvinuty NiCd články s extrémně vysokou kapacitou, která je srovnatelná s NiMH. Testy provedené firmou Cadex ukázaly dobré výsledky s novou pěnovou formou NiCd článků od firmy Panasonic. Sanyo představilo nově "slepované" články s podobným výkonem jako "pěnové" články od firmy Panasonic.

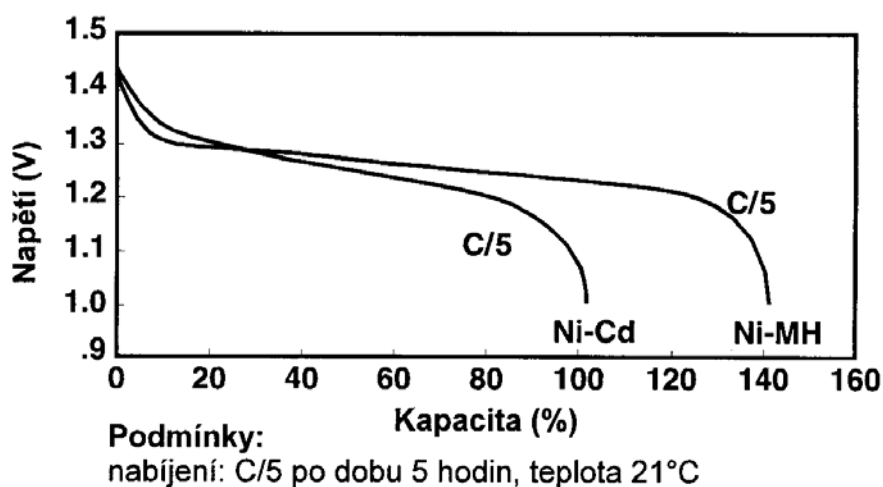
6. **Vnitřní odpor:** Při zvyšování kapacity NiMH musíme však řešit některé kompromisy. K získání více energie je do článku uloženo více aktivních materiálů. V důsledku toho se zvýší vnitřní odpor, který omezí maximální nabíjecí a vybíjecí proud. Články s extrémně vysokou kapacitou mají také sklon k nadměrnému zahřívání během rychlého nabíjení/vybíjení. Další negativní vlastností může být menší počet cyklů nabití/vybití oproti standardním NiCd článkům.
7. **Cena:** Cena NiMH článků je asi o 30 - 50% vyšší než u NiCd. Tato vyšší cena nemusí být překážkou v aplikacích vyžadujících velkou kapacitu a malé rozměry jako jsou například mobilní telefony. Velkou cenovou konkurencí pro NiMH jsou NiCd "pěnové" baterie od firmy Panasonic, které jsou jen nepatrně dražší než standardní NiCd baterie.

## 4. Výkonové charakteristiky

### 4. 1. Vybíjení

#### 4. 1. 1 Vybíjecí charakteristiky

Vybíjecí charakteristika NiMH článku je velice podobná vybíjecí charakteristice NiCd článku. Bezproude napětí nabitých článků se u obou typů pohybuje v rozsahu 1,25 až 1,35V/článek.

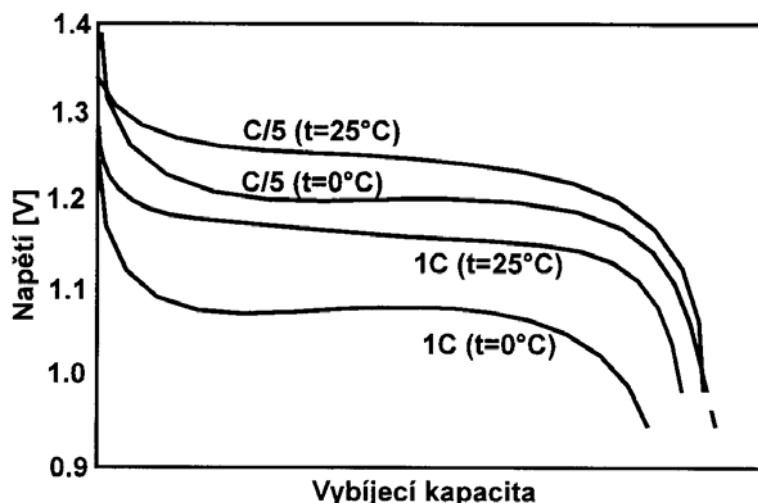


Obr. 4. 1. Vybíjecí charakteristika NiCd a NiMH článku

Při vybíjení je typické napětí 1,2V na článek a konečné vybíjecí napětí je 1,0V/článek. Na obr. 4.1 jsou znázorněny vybíjecí charakteristiky NiCd a NiMH článků stejných rozměrů. Vybíjecí charakteristika je plochá u obou typů téměř po celou dobu vybíjení. Obrázek také může sloužit pro porovnání kapacit NiCd a NiMH článků. Je vidět, že kapacita typického NiMH článku je o 40% vyšší, než kapacita NiCd článku stejného rozměru.

#### 4. 1. 2 Vliv vybíjecího proudu a teploty

Na obr. 4. 2 je znázorněna závislost vybíjecí charakteristiky na vybíjecím proudu a na teplotě okolí. Při větším proudu a za nižších teplot bude pracovní napětí nižší. Je to způsobeno zvětšením napěťového úbytku ( $I_{\text{VYB}} \cdot R_{\text{VNITŘNÍ}}$ ) při vyšším proudu a zvýšením vnitřního odporu baterie za nízkých teplot. Kapacita může být zvýšena vybíjením na nižší vybíjecí napětí. Baterie by však neměla být vybíjena pod určité napětí (0,9=1V/článek), jinak hrozí poškození baterie.



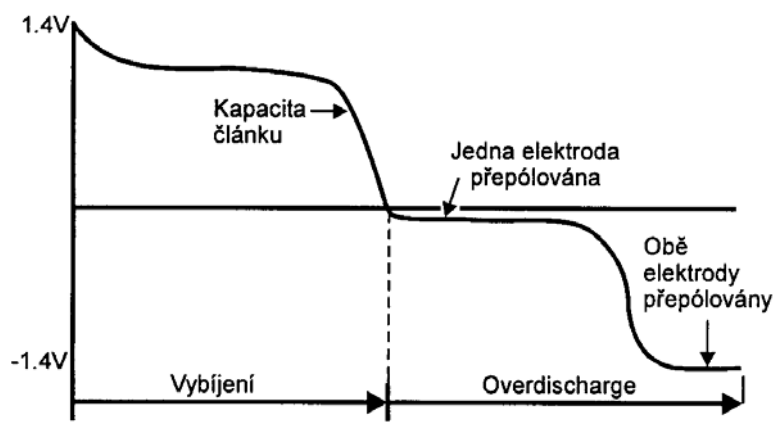
Obr. 4. 2. Vybíjecí charakteristiky pro různé teploty a proudy

Optimální výkonnosti NiCd a NiMH baterií je dosaženo při teplotách 0°C až 45°C. Kapacita baterie se velmi znatelně snižuje při velkých vybíjecích proudech a nízkých teplotách. Při menších vybíjecích proudech (asi C/5) je ale vliv nízké teploty na kapacitu baterie minimální.

#### 4. 1. 3. Převrácení polarity během vybíjení

Pokud jsou články spojeny do série, článek s nejmenší kapacitou se vybije dříve než ostatní. Článek se začne chovat jako kondenzátor, který je proudem ostatních článků přebíjen na opačnou polaritu (obr. 4.3.).

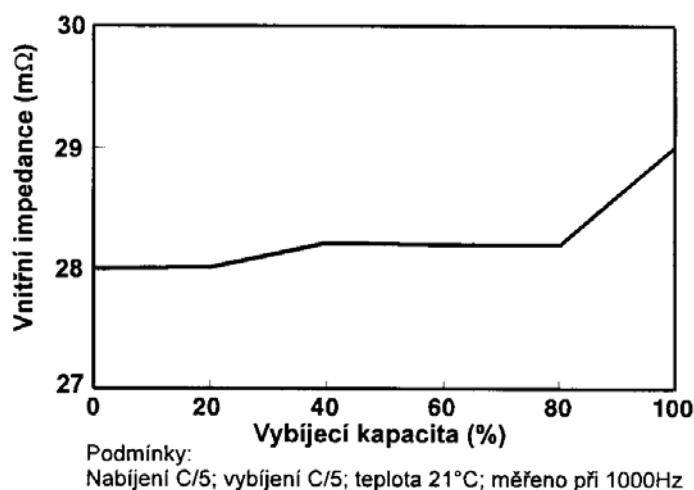
Takovému stavu se říká "overdischarge". Čím více článků je "zapojeno do série, tím je větší pravděpodobnost tohoto stavu. Jako první se přepóluje kladná elektroda a začne uvolňovat vodík. Vodíkový plyn je pohlcen na záporné elektrodě, na které se nakonec začne uvolňovat kyslík. Dlouhé setrvání v tomto stavu vede k nárůstu vnitřního tlaku, při kterém se může uvolnit bezpečnostní ventil. Stav overdischarge můžeme zabránit ukončením vybíjení při napětí 1,0V/článek.



Obr. 4. 3 Přepólování článku

#### 4. 1. 4. Vnitřní impedance

Nízké vnitřní impedance baterie je dosaženo vhodnou konstrukcí baterie. Tenké elektrody umožňují dosáhnout velkého stykové povrchu a tím i dobré vodivosti. Obr. 4.5 ukazuje změnu impedance během vybíjení. Impedance zůstává téměř po celou dobu konstantní. Ke konci vybíjení se ale impedance zvyšuje vlivem přeměny aktivních materiálů do nevodivé formy.



Obr. 4. 5 Impedance článku při vybíjení

### 4. 2. Nabíjení

#### 4. 2. 1. Základní principy

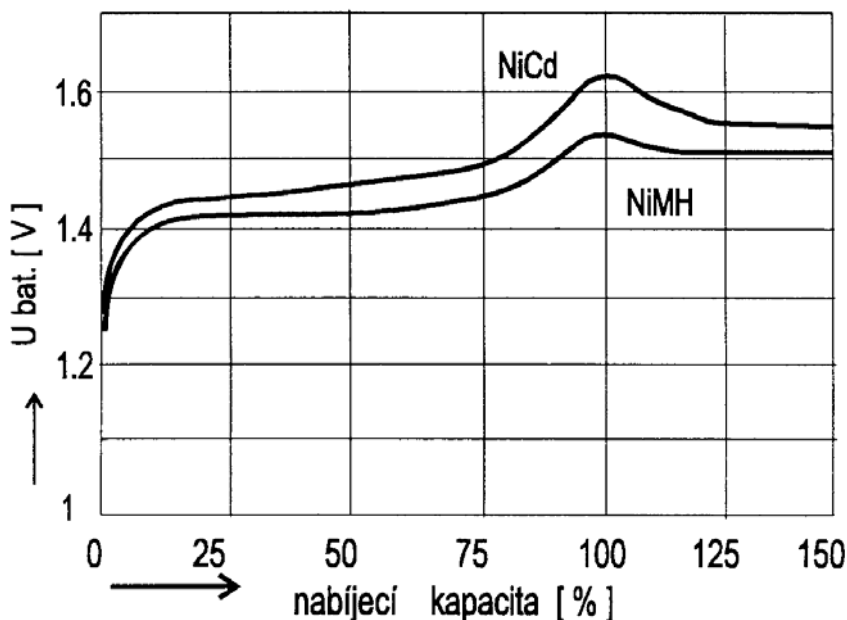
Při nabíjení je baterii doplňována energie, jenž byla baterii odebrána při vybíjení. Výkon baterie závisí, jak na zacházení s baterií během doby života, tak i na efektivním nabíjení. Hlavní zásady pro efektivní nabíjení jsou:

- výběr vhodné velikosti nabíjecího proudu
- omezení teploty
- výběr vhodné techniky pro ukončení nabíjení

Nabíjení sekundárních článků NiCd a NiMH není proces, který by měl stoprocentní účinnost. Větší část energie se vytváří aktivní materiál, který se později využije při vybíjení. Menší část energie se spotřebuje na parazitní procesy, vytváření plynů kyslíku a vodíku (a samozřejmě jako při každých přeměnách energie i na teplo). V závěrečné fázi nabíjení se značně zvětšuje množství vyvíjených plynů, při správném nabíjení plyn v člancích rekombinuje. Účinnost nabíjení s blížícím se koncem nabíjení klesá. Stále více energie vytváří plyny a teplo a stále méně energie vytváří aktivní materiál, schopný při vybíjení energii vracet. Dosahovaná účinnost  $\eta_{Ah}$  je u NiCd článků 83%, u NiMH 80%. V praxi se tato ztráta energie hradí nabíjením na 140% u NiCd článků a na 160% u NiMH článků.

Napětí nabíjených článků nejprve stoupá až do okamžiku, kdy jsou plně nabity a potom mírně klesá. Maximum je výraznější u NiCd než u NiMH, což je vidět na obr.4. 6. Pokud zvětšujeme nabíjecí proud, extrémy křivek se zvětšují. Zatím co při nabíjecím proudu 1CA je velmi výrazný, při 0,1CA je tento extrém velmi málo patrný

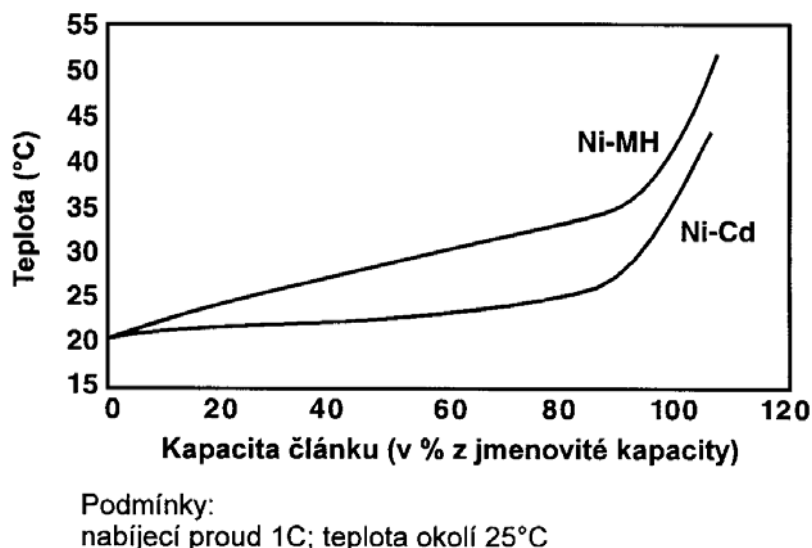
Obr. 4. 6 porovnává napěťové průběhy NiCd a NiMH baterií během nabíjení konstantním proudem 1C při teplotě 21°C. Napětí se u obou typů zvyšuje tak jak baterie přijímají náboj. Když baterie dosáhne 75 až 80% kapacity, zvýší se vlivem uvolňování kyslíku prudce u obou typů napětí. Při přebíjení však NiMH baterie nevykazuje tak nápadný napěťový pokles jako NiCd baterie.



Obr. 4. 6 Typická nabíjecí napěťová charakteristika NiCd a NiMH článku

Obr. 4.7 porovnává teplotní průběhy NiCd a NiMH baterií nabíjených konstantním proudem. Během prvních 80% nabití se teplota NiCd baterie zvyšuje pozvolna, protože její nabíjecí reakce je endotermická (pohlcuje teplo). Teplota NiMH baterií se naproti tomu zvyšuje rychle, protože nabíjecí reakce je exotermická (uvolňuje teplo). Po 80 až 85% nabití se teplota u obou typů baterií zvyšuje vlivem exotermické rekombinaci kyslíku, způsobující napěťový pokles v době, kdy baterie dosáhnou plného nabití a nastane přebíjení.

Jak pokles napětí ( $-\Delta U$ ) tak i nárůst teploty je možno použít ke stanovení okamžiku pro ukončení nabíjení. Zatímco pro nabíjení NiCd a NiMH baterií mohou být použity podobné nabíjecí techniky, podmínky pro ukončení nabíjení se mohou lišit v důsledku odlišného chování obou typů během nabíjení.

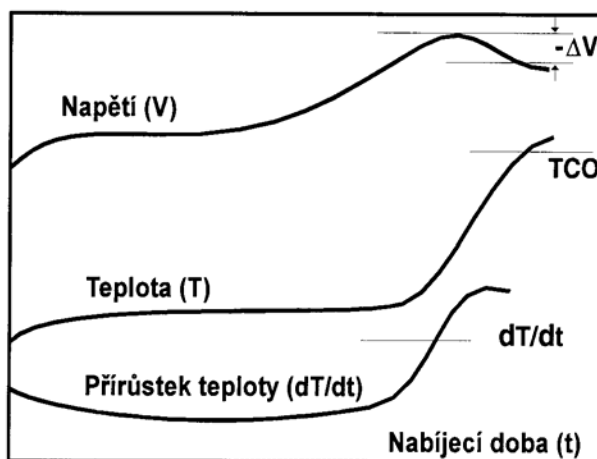


Obr. 4. 7 Typická nabíjecí teplotní charakteristika NiCd a NiMH článku

Napětí NiCd a NiMH baterie při nabíjení závisí na mnoha podmínkách včetně nabíjecího proudu a teploty. Napětí baterie roste se zvyšujícím se nabíjecím proudem vlivem nárůstu úbytku ( $I_{NAB} \cdot R_{VNITRNI}$ ). Napětí baterie klesá se zvyšující se teplotou, neboť se snižuje vnitřní odpor. Teplota také ovlivňuje účinnost nabíjení. Účinnost nabíjení klesá při vyšších teplotách vlivem zvýšené produkce kyslíku na kladné elektrodě. Správné nabíjení je rozhodující nejen pro získání maximální kapacity, ale také k zamezení vysokých vnitřních teplot, tlaků a dalších stavů, které nepříznivě ovlivňují životnost baterie.

#### 4. 2. 2. Techniky pro řízení nabíjení

Vlastnosti NiCd a NiMH baterií vyžadují správné řízení nabíjení. Řízení musí přerušit ve vhodnou chvíli nabíjení, aby se zamezilo přebíjení nebo nadměrným teplotám uvnitř článku. Každá nabíjecí technika má své výhody i nevýhody. Například vyšší vybíjecí kapacity je dosaženo při nabíjecí kapacitě 150%, ale za cenu snížení životnosti. Dlouhé životnosti je dosaženo při nabíjecí kapacitě 105=110%, ačkoli s menší využitelnou kapacitou vlivem menší nabíjecí kapacity. Na obr. 4. 8 jsou zobrazeny vlastnosti několika doporučených metod pro řízení nabíjení. Některé z těchto metod jsou vhodné i pro rychlé nabíjení.



Obr. 4. 8 Různé techniky pro ukončení nabíjení

## Časované nabíjení

Při časovaném nabíjení je nabíjení baterie přerušeno po předem nastavené době. Tato metoda by měla být použita pouze pro nabíjení malým proudem (menším než  $C/3$ ), abychom se vyhnuli nadměrnému přebíjení, protože před nabíjením nemůže být stanoven stav nabití baterie. Při časovaném přerušení nabíjení je doporučena 120% nabíjecí kapacita.

## Záporný přírůstek napětí ( $-\Delta U/dt$ )

Vyhodnocování poklesu napětí je často využíváno pro nabíjení NiCd baterií. Při této metodě je sledováno napětí během nabíjení a když se napětí začne snižovat, je nabíjení přerušeno. Tato metoda může být použita i pro NiMH baterie, ale napět'ový pokles u NiMH baterie není tak výrazný jako u NiCd baterie a dokonce může chybět při nabíjecích proudech pod  $C/3$ , zvláště pak za vyšších teplot. Obvod na měření napětí musí být dostatečně citlivý, aby přerušil nabíjení při poklesu napětí, ale ne tak citlivý, že by přerušil nabíjení předčasně kvůli šumu nebo běžnému kolísání napětí. Pro NiMH baterie je doporučen nabíjecí proud 1C a napět'ový pokles 5 až 10 mV na článek. Vrcholové nabíjení (top-up) není nutné pro tuto nabíjecí metodu. Z integrovaných obvodů určených pro nabíjení baterií tuto techniku využívá např. MAX2003 nebo LTC 1325.

## Nulový napět'ový přírůstek ( $\Delta U=0$ )

Protože NiMH baterie nevykazují vždy odpovídající napět'ový pokles, je pro jejich nabíjení použita alternativní metoda. Metoda přerušuje nabíjení poté co napětí dosáhne vrcholu a další přírůstek napětí je nulový. Riziko přebíjení NiMH baterií je sníženo oproti metodě  $-\Delta U$ , kdy čekáme na napět'ový pokles. Pro použití této metody je doporučen nabíjecí proud o velikosti 1C. Vrcholové nabíjení by mělo následovat k zajištění plného nabití. Tato metoda není doporučována některými výrobci NiMH baterií (např. firmou DURACELL®), protože je u ní riziko předčasného ukončení nabíjení. Integrovaný obvod pracující s touto technikou je např. MAX712 nebo také MAX2003, který provádí každých 30s celkem 16 měření a získané údaje každého z nich porovnává s předchozími výsledky.

## Teplotní ukončení

Další metoda pro řízení nabíjení sleduje zvýšení teploty baterie a přerušuje nabíjení, když baterie dosáhne teploty, která indikuje začátek přebíjení. Je obtížné přesně stanovit tento bod, neboť je ovlivněn teplotou okolí, konstrukcí baterie, nabíjecím proudem a dalšími faktory. Studená baterie může být například přebíjena než dosáhne ukončovací teploty, zatímco teplá baterie nemusí být zcela nabitá.

Tato metoda je velmi často používána v kombinaci s ostatními metodami zejména pro ukončení nabíjení v případě, že baterie dosáhne nadměrné teploty dříve, než zareagují ostatní ukončovací metody. Je doporučován nabíjecí proud o velikosti 1C a ukončovací teplota 45 až 50°C. Vrcholové nabíjení není doporučeno při použití této ukončovací metody.

## Teplotní přírůstek ( $\Delta TCO...$ delta temperature cutoff)

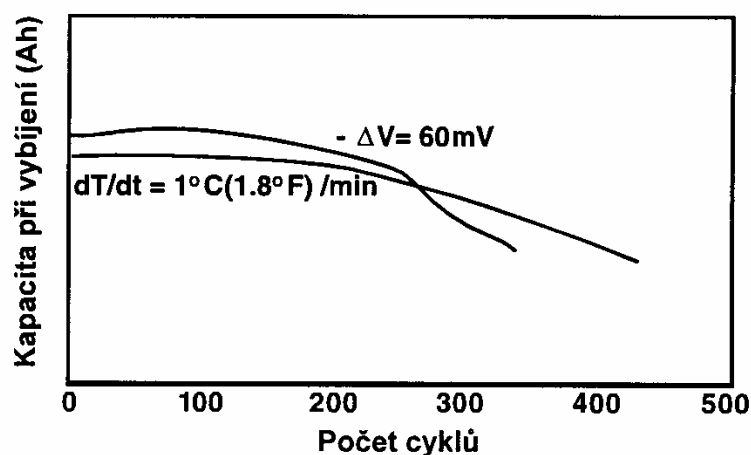
Při této metodě je sledováno zvýšení teploty baterie oproti teplotě na začátku nabíjení. Nabíjení je přerušeno, když zvýšení teploty překročí předem stanovenou hodnotu. Přírůstek pro ukončení závisí na několika faktorech jako je rozměr článku, uspořádání a počet článků baterie a tepelná kapacita baterie. Proto by měla být hodnota přírůstku stanovena individuálně



pro každý typ baterie. Pro NiMH baterie bude přírůstek teploty vyšší než pro NiCd baterie (viz. obr. 4.7). Je doporučován nabíjecí proud o velikosti 1C a teplotní změna 15°C (typická hodnota). Vrcholové nabíjení není potřebné pro tuto metodu.

### Rychlost teplotního přírůstku ( $dT/dt$ )

V této metodě je sledována změna teploty s časem (derivace) a nabíjení je přerušeno když derivace teploty překročí předem stanovenou hodnotu. Tím je omezen vliv teploty okolí. Metoda  $dT/dt$  je doporučována pro nabíjení NiMH baterií, protože zajišťuje dlouhou životnost. Obr. 4. 9 ukazuje výhody  $dT/dt$  metody oproti metodě záporného přírůstku napětí ( $-\Delta U$ ). Metoda  $dT/dt$  zaznamená počátek přebíjení dříve než metoda  $-\Delta U$ . Baterie je vystavena menšímu přebíjení a přehřívání, což se odrazí v delší životnosti. Pro metodu  $dT/dt$  je doporučen nabíjecí proud o velikosti 1C a zvýšení teploty 1°C za minutu. Je také doporučeno vrcholové nabíjení proudem C/10 po dobu 1/2 hodiny.



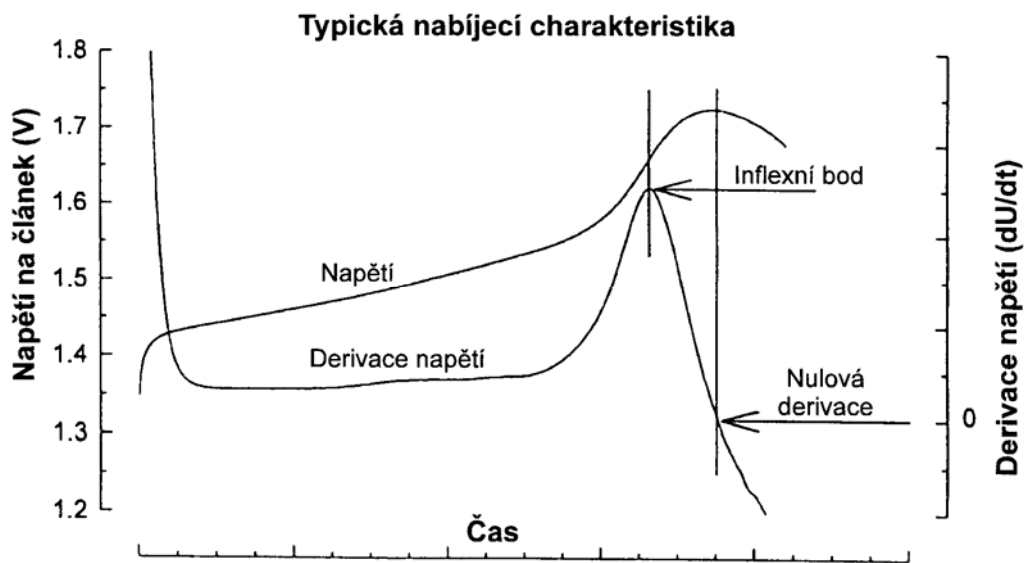
Obr. 4. 9 Životnost a kapacita NiMH baterie pro různé ukončovací techniky

### Inflexní bod ( $d^2U_{BAT}/dt=0$ )

Jedná se o moderní metodu pro ukončení nabíjení baterií. Její realizace je poměrně náročná, protože potřebuje řídicí jednočipový mikroprocesor, ale je velmi spolehlivá. Hlavním požadavkem všech spotřebitelů je nabít baterii rychle a bezpečně, aby nedošlo ke snížení životnosti baterie. Rychlé nabíjení musí být spolehlivě ukončeno, aby článek nebyl přebíjen velkým proudem.

Při sledování záporného přírůstku napětí ( $-\Delta U$ ) dochází k ukončení nabíjení až po závěrečném nárůstu teploty. Nárůst teploty totiž vyvolá pokles vnitřního odporu, což se odrazí v poklesu napětí. Zde se tedy plně potvrdily teoretické předpoklady.

Při sledování druhé derivace napětí je rychlé nabíjení velkým proudem ukončeno ještě před závěrečným nárůstem teploty. Poté nastane časově omezené Top-up nabíjení. Teplota během Top-up u NiCd článku zůstává přibližně konstantní a u NiMH článku někdy dokonce mírně klesá. Toto je velmi "šetrné" nabíjení, které příznivě ovlivňuje životnost článku.

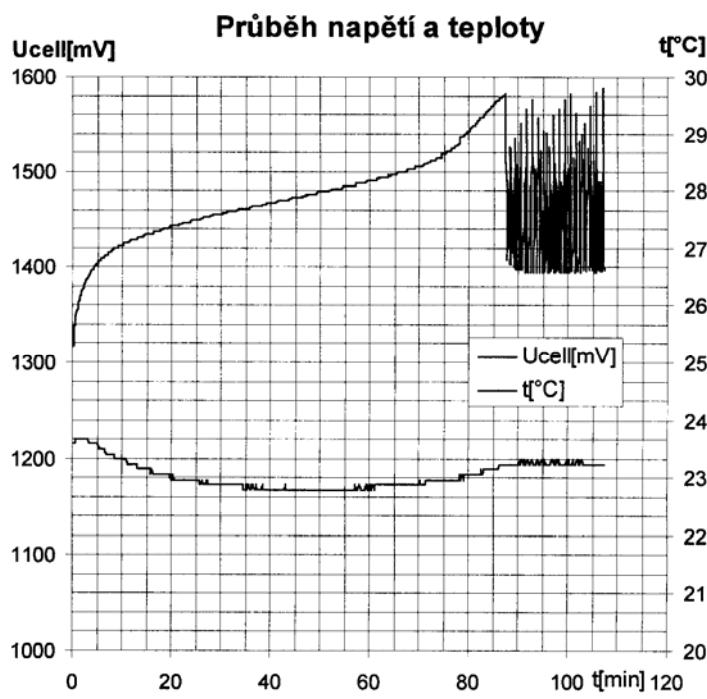


Obr. 4. 10 Průběh napětí a jeho derivace během nabíjení

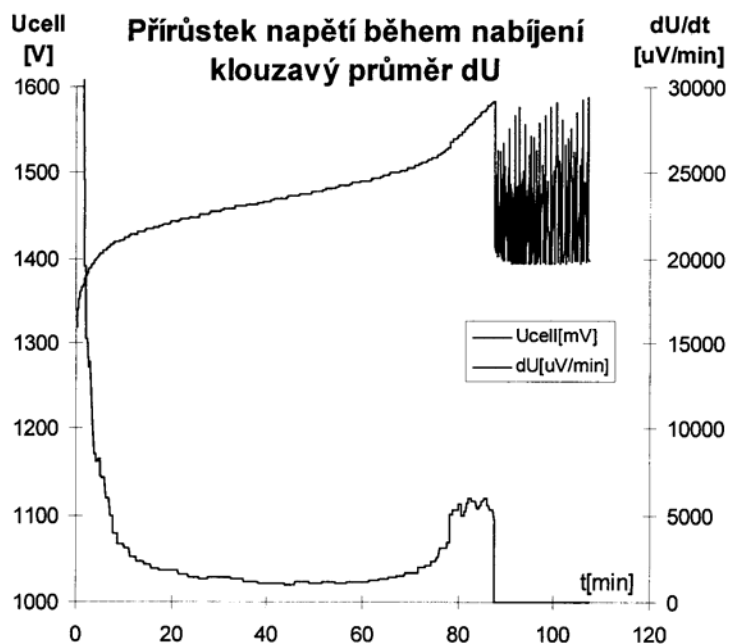
Vyhodnocování teploty během nabíjení je v tomto případě použito jen jako doplňkové a má spíše pojistný charakter. Dochází k odpojení baterie při nadměrném přehřátí v případě vadného článku.

Nabíjecí algoritmus je tedy založen na sledování napětí baterie. Typický průběh napětí a derivace napětí na článku během nabíjení je zřejmý z obr. 4.10.

Zpočátku nabíjení (20minut) sleduje řídicí mikroprocesor pouze záporný přírůstek napětí ( $-\Delta U_{BAT}$ ). Během této doby dojde k ustálení derivace napětí. Poté se začne také sledovat derivace napětí na baterii ( $dU_{BAT}/dt$ ). Protože derivace napětí během nabíjení značně kolísá, je nutno provádět její průměrování. Vliv klouzavého průměrování  $dU_{BAT}$  je patrný z obr. 4.11b.



Obr. 4. 11a Průběh napětí a teploty



Obr. 4.11b Křivka klouzavého průměru dU

Pokud derivace napětí dosáhne svého lokálního extrému a začne klesat, program signalizuje že bylo dosaženo inflexního bodu (tj. bodu ve kterém  $d^2UBAT/dt=0$ ) a přepne se na časově omezené vrcholové (Top-up) nabíjení. Po dosažení inflexního bodu je článěk nabit na 80 až 85% své kapacity. V průběhu Top-up je článěk nabíjen přerušovaným nabíjením (1/4 času nabíjení, 3/4 času pauza). Střední hodnota nabíjecího proudu je tím snížena na 1/4. Přerušovaný nabíjecí proud je velice vhodný pro Top-up nabíjení, protože kyslík vznikající ke konci nabíjení na kladné elektrodě má dostatek času na to aby rekombinoval na záporné elektrodě. Tím se omezí nárůst vnitřního tlaku a teploty v závěrečné fázi nabíjení.

Na obr. 4.11a,b je skutečná naměřená charakteristika na NiCd článku EMMERICH GmbH, 700mAh, size AA, nabíjecí proud = 0.33A, TopUp přerušované nabíjení 20min.

#### 4. 2. 3 Nabíjecí metody

Pro nabíjení *NiCd* i *NiMH* baterií lze použít stejné nabíjecí metody, lišící se pouze ve způsobu ukončení nabíjení. Pro správné nabíjení by měla být použita vhodná ukončovací technika, která bere v úvahu velikost nabíjecího proudu (viz tabulka).

Nabíjecí proud	Ukončovací technika
$1C \div C/2$	založená na napětí nebo teplotě
$C/2 \div C/3$	založená na napětí
$C/3 \div C/10$	není stanovena
$C/10$ a méně	časové omezení

**Pomalé nabíjení (≈12hod)**

Nabíjení konstantním proudem o velikosti  $C/10$  s časovým omezením je tradiční metoda pro plné nabití NiCd a NiMH baterií. Při této velikosti proudu stačí všechen vznikající kyslík rekombinovat na záporné elektrodě. Nabíjení by mělo být přerušeno po 120% nabíjecí kapacity, tedy přibližně po 12h pro plně vybitou baterii. Teplotní rozsah pro tuto nabíjecí metodu je  $0^{\circ}\text{C}$  až  $45^{\circ}\text{C}$ , přičemž maximální účinnosti dosáhneme od  $15^{\circ}\text{C}$  do  $30^{\circ}\text{C}$ .

**Zrychlené nabíjení (≈4hod)**

NiCd a NiMH baterie mohou být účinně a bezpečně nabity i při vyšších proudech. Je pro to třeba použít řízené nabíjení, které přeruší ve vhodný okamžik nabíjení, aby se zamezilo přebíjení a nadměrnému nárůstu teploty. Baterie je nabíjena proudem o velikosti  $C/3$  a nabíjení je ukončeno při záporném přírůstku napětí (metoda  $-\Delta U$ ). Pro ukončení nabíjení nelze použít metodu  $dT/dt$ , protože rychlost nárůstu teploty při nabíjecím proudu  $C/3$  není dostatečná k přerušení nabíjení. Jako doplňkovou metodu, chránící před nadměrnými teplotami lze použít časovač nastavený na 120% nabíjecí kapacity (3,6hod). Tato nabíjecí metoda může být použita při teplotách od  $10^{\circ}\text{C}$  do  $45^{\circ}\text{C}$ .

**Rychlé nabíjení (≈1 hod)**

Rychlé nabíjení je další metodou pro nabíjení NiCd a NiMH baterií v podstatně kratším čase a využívá konstantní proud o velikosti  $C/2$  až  $1C$ . Při takovýchto velikostech nabíjecího proudu je přímo nezbytné včas přerušit nabíjení baterie, protože nadměrná teplota a tlak vznikající při přebíjení tak velkým proudem by mohly snadno poškodit články, popřípadě uvolnit bezpečnostní ventil. Časovou kontrolu nabíjení nemá smysl použít, neboť čas na nabíjení nemůže být přesně předpovězen. Částečně nabitá baterie by mohla být snadno přebíjena, zatímco plně vybitá by nebyla dostatečně nabita v závislosti na nastavení časové kontroly.

Pro ukončení rychlého nabíjení je možno využít, jak napěťový pokles ( $-\Delta U$ ), tak i zvýšení teploty ( $\Delta T$ ). Ještě lepších výsledků je dosaženo při měření rychlosti přírůstku teploty ( $dT/dt$ ).

**Udržovací (konzervační) nabíjení**

Velký počet aplikací vyžaduje, aby byla baterie udržována v pohotovosti, v plně nabitém stavu. Toho lze dosáhnout konzervačním nabíjením proudem, který nahradí ztráty kapacity způsobené samovybíjením. Pro tyto aplikace je doporučen nabíjecí proud o velikosti  $C/300$  až  $C/100$ . Nejvhodnější teplota pro konzervační nabíjení je v rozsahu od  $10^{\circ}\text{C}$  do  $35^{\circ}\text{C}$ . Konzervační nabíjení může být použito po kterékoliv z předchozích nabíjecích metod.

**4. 3. Životnost baterií**

Životnost *NiCd* a *NiMH* baterií závisí na mnoha podmínkách, kterým je baterie vystavena. Tyto podmínky jsou:

- teplota během nabíjení a vybíjení
- nabíjecí a vybíjecí proud
- hloubka vybití

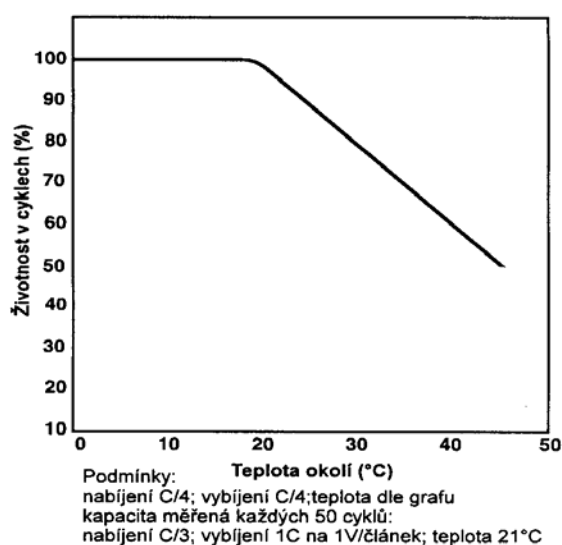
- vystavení baterie přebíjení a přepólování baterie během vybíjení
- podmínky při skladování

Během používání článku se jeho kapacita snižuje. Životnost článku se měří v počtu cyklů nabíjení/vybíjení až do okamžiku kdy kapacita článku poklesne na 80% jmenovité kapacity. Postupné snižování kapacity vlivem zvýšení vnitřního odporu baterie je zapříčiněno nevratnými změnami struktury elektrod, rozložení elektrolytu a vysušením separátoru. Optimální životnosti baterie a maximálního počtu cyklů je dosaženo při používání baterie za pokojové teploty (kolem 20°C).

Obr. 4.12 graficky znázorňuje, jak opakované vysoké provozní teploty během nabíjení a vybíjení nepříznivě ovlivní životnost baterie, protože urychlují degradaci separátoru a ostatních materiálů v článku. Při teplotách pod 0°C dojde ke zpomalení rekombinace kyslíku a tím se baterie stane citlivá na přebíjení, při kterém mnohem rychleji stoupne vnitřní tlak.

Nabíjecí proud a množství náboje během přebíjení jsou další důležité faktory ovlivňující životnost. Když je baterie nabíjena rychlostí, která přesahuje rychlost rekombinace kyslíku, vznikající kyslík nestačí reagovat a způsobí nárůst tlaku a teploty. Tento nárůst má zničující efekt na životnost baterie.

Životnost je také ovlivněna hloubkou vybití. Udávaná cyklická životnost je stanovena pro plné vybití v každém cyklu (100% hloubka vybití). Podstatně vyššího počtu cyklů je možno dosáhnout, když je baterie vybíjena s malou hloubkou vybití. Proto tedy, jestliže s "rozmyslem" hluboko vybíjíme NiCd článek před každým nabíjením, plýtváme podstatnou částí jeho doby životnosti, což je značně neefektivní.



Obr. 4. 12 Životnost jako funkce teploty okolí

#### 4. 4. Skladování NiCd a NiMH baterií

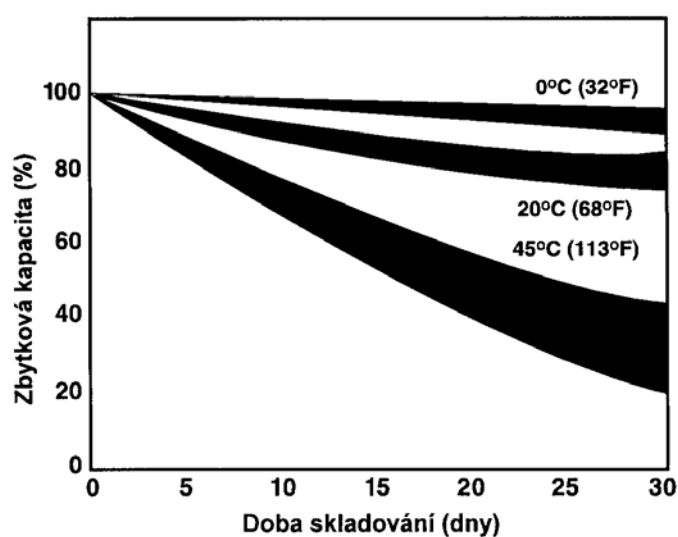
Podmínky při skladování mají vliv jak na výkonnost tak na životnost baterie. Tyto vlivy se dají dělit do dvou skupin:

- krátkodobé skladovací účinky (samovybíjení), týkající se ztráty náboje z nabitě kapacity
- dlouhodobé skladovací účinky, které mohou zkrátit životnost baterie v případě, že je baterie nevhodně uskladněna

#### 4. 4. 1. Samovybíjení baterií

Všechny nabíjecí baterie ztrácejí s časem svůj náboj bez ohledu na to, jestli jsou používány či nikoliv. Tato ztráta náboje se nazývá samovybíjení. Přibližně platí, že při zvýšení skladovací teploty o 10°C se doba, kdy baterie ztratí stejné množství náboje, zkrátí na polovinu.

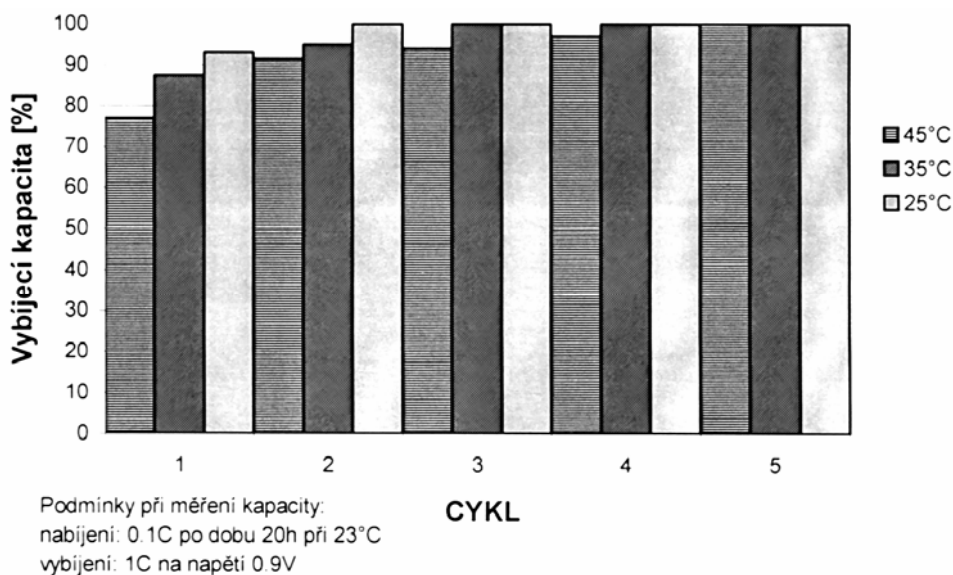
U NiMH baterií je samovybíjení způsobeno reakcí zbytkového vodíku v baterii s kladnou elektrodou a dále pomalým vratným rozkladem kladné elektrody. Míra samovybíjení závisí na teplotě a době skladování. Z obr. 4.13 je zřejmé, že čím vyšší je teplota tím větší je samovybíjení. Dlouhodobé skladování NiMH baterií, jak v nabitém, tak i ve vybitém stavu, neovlivňuje jmenovitou kapacitu. Pokles kapacity vlivem samovybíjení je vratný a NiMH baterie řádným nabitím získá plnou kapacitu.



Obr. 4. 13 Samovybíjení NiMH článku

#### 4. 4. 2. Dlouhodobé skladování

Dlouhodobé skladování je obvykle definováno jako skladování, při němž se baterie samovybíjením zcela vybijí a je dále skladována ve vybitém stavu, například skladování v nezátíženém stavu za pokojových teplot po dobu delší než šest měsíců. Stejně jako provoz baterií za zvýšených teplot, může dlouhodobé skladování za vysokých teplot vést k degeneraci těsnění a separátoru, čímž se sníží životnost baterie. Doporučený teplotní rozsah pro dlouhodobé skladování je 0 až 30°C. Plná kapacita dlouhodobě skladované baterie, může být obnovena opakovanými cykly nabíjení/vybíjení. Na obr. 4.14 je zobrazeno, jaký počet cyklů je potřeba pro obnovu plné kapacity článků skladovaných jeden rok za různých teplot.



Obr. 4. 14 Obnova kapacity po skladování za různých teplot

Rychle nabíjené články (proudem 1C) budou po dlouhodobém skladování vykazovat při prvním nabíjecím cyklu zvýšené napětí. Toto vyšší nabíjecí napětí může u napětově řízených nabíjecích systémů předčasně ukončit rychlé nabíjení.

Dalším problémem přináší použití NiCd baterií jako záložních zdrojů energie (např. pro polovodičové paměti). Po vybití baterie dojde k tomu, že elektrická zátěž je trvale připojena k baterii, jenž je ve vybitém stavu. Baterie je tedy skladována v zatíženém stavu a napětí na baterii dosáhne nuly. Pokud je napětí na NiCd baterii udržováno na nule po dosti dlouhou dobu, může dojít k pomalému prosakování elektrolytu (KOH), který se hromadí na povrchu pod kladným vývodem. Toto malé množství elektrolytu se nakonec dostane bezpečnostním ventilem ven, na vnější povrch kladného vývodu. Na vzduchu elektrolyt reaguje s oxidem uhličitým a vytvoří bílé krystalky. Prosakující hydroxid draselný může způsobit korozi okolních elektronických komponentů. Pokud tedy nejsou články zatěžovány, lze je skladovat ve vybitém stavu.

## 5. Důležité informace pro používání NiCd a NiMH článků

1. Baterii nevkládat do nabíječe, pokud je zahřátá, protože takové baterie se chovají při nabíjení jinak.
2. Nepoužívat, pokud možno, k vybíjení tzv. "discharger" pochybného původu, který neobsahuje automatické přerušení vybíjení a není tedy schopen zabránit dosažení nulového napětí.
3. Nová baterii nebo baterie, která je delší dobu mimo provoz (např. několik měsíců), je vhodné po této přestávce nabíjet 12 - 16 hodin proudem 0,1 CA, protože při tomto způsobu nabíjení je akumulátor schopen pojmout 80 - 90% své kapacity a je tedy ihned po nabití použitelný a není nutné jej cyklovat na 3 - 5 doporučených cyklů.
4. Je vhodné dodržovat zásadu, že baterie nemá zůstat v libovolném nabíjecí déle než je předepsáno, neboť by to mohlo způsobit nežádoucí vedlejší účinky, jako je přehřátí akumulátorů nebo dokonce při úplném vybití obrácení polarity. Při obrácení polarity může

dojít k rekrystalizaci na anodě a k úniku vodíku pojistným ventilem, což má za následek opět snížení kapacity baterie.

5. Je třeba brát v úvahu, že všechny akumulátory jsou do určité míry citlivé na zvýšenou teplotu.
6. Neplatí pravidlo které zní, že baterie je potřeba vždy vybíjet až do úplného využití kapacity (vybití). Toto tvrzení se rozhodně netýká NiCd baterií, což dokumentují již informace v předchozích kapitolách. Pokud využíváme kapacitu baterií pouze ze 30% a poté je dobíjíme, můžeme dosáhnout životnosti 3000 a dokonce (za určitých podmínek) až 5000 nabíjecích cyklů. Při využívání kapacity na 50% se dostáváme k životnosti cca 2000 nabíjecích cyklů. Ovšem při dodržení doporučení o vyčerpání 100% kapacity dosáhneme pouze 400 - 500 nabíjecích cyklů.
7. Je doporučeno skladování ve vybitém stavu, s přerušeným obvodem a při teplotách od +5°C do 25°C. Doporučená relativní vlhkost je 65% +/- 20%.
8. V napájených zařízeních nekombinovat primární a sekundární články.
9. Za konečné napětí vybíjených článků považovat napětí 1V, při větším zatížení je to 0,9V.
10. Před nabíjením je také vhodné přesvědčit se, že jsou články do nabíječe správně vloženy a zda není mezi ně omylem zařazen i primární článek. Typická hodnota vnitřního odporu tužkových článků NiCd nebo NiMH je 20mΩ. Primární alkalické články mají vnitřní odpor zhruba 400mΩ, a suchý galvanický asi 0.5Ω. Zátěž proudem 500mA, proto vyvolá pokles napětí každého sekundárního článku o 10mV nebo alkalického o 200mV.
11. Na kontakty článků nepájet žádné dodatečné vývody, dojde k trvalému poškození článku vysokou teplotou. Většina současných výrobců má široký sortiment vyráběných typů s již připravenými vývody, např. pro použití do plošných spojů

### 5. 1. Přehled důležitých parametrů článků NiCd a NiMH

	<u>článek NiCd</u>	<u>článek NiMH</u>
Klidové napětí nabitého článku ( $I_z=0$ )	1,28 až 1,35V	1,3 až 1,4V
Jmenovité napětí článku (při zatížení proudem 0.2CA)	1,2V	1,2V
Konečné vybíjecí napětí		
při vybíjení proudem < 0.2CA	1,2V	1,1V
při vybíjení proudem > 0.2CA	0,9V	0,9V
Konečné napětí nabitého článku		
nabíjení proudem 0,1CA po dobu 14hod	> 1,45V	
nabíjení proudem 0,1CA po dobu 16hod		> 1,45 V
Jmenovitý nabíjecí proud (obvykle 0. 1 CA)		
-proud, potřebný pro plné nabití článku za dobu	14 hod	15 až 16 hod
Jmenovitá kapacita článku		
-náboj, který lze z článku odebrat proudem 0,2CA po dobu 5 hod. Napětí článku nesmí klesnout pod napětí	1,0V	1,0V
Ampérhodinová účinnost článku $\eta_{Ah}$		
-podíl kapacity článku při vybíjení a nabíjení	0,83	0,8
V praxi články nabíjíme na	1,4CA	1,5 až 1,6CA



**Srovnání kapacity a hmotnosti článků:**

Článek	zinkouhlíkový Leclanché		alkalický		niklokadmiový NiCd		niklohydridový NiMH	
	CA [mAh]	m [g]	CA [mAh]	m [g]	CA [mAh]	m [g]	CA [mAh]	m [g]
malý tužkový	-	-	1050	11	180	10		
tužkový	1100	21	2300	22	800	24	1100	25
malý monočlánek	3100	46	6300	61	1500	55/1.4Ah 67/2Ah		
velký monočlánek	7300	95	12000	134	4400	78/1.4Ah 147/4Ah		
baterie 9V	280	38	550	46	110 (8.4V)	40		
jmenovité napětí jednoho článku	1.5V		1.5V		1.2V		1.2V	