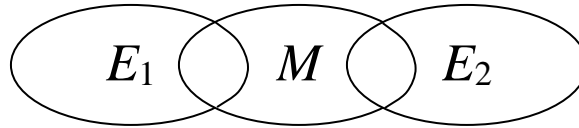


Premena elektrickej energie na mechanickú prácu

Každý elektrický stroj má tri samostatné obvody. Primárny elektrický obvod E_1 , magnetický obvod M a sekundárny elektrický obvod E_2 . Jednoduchou schémou na obr. 1 je znázornená väzba medzi elektrickými obvodmi E_1 a E_2 prostredníctvom magnetického M .



Obr. 1 Tri základné časti elektrického stroja

Princíp elektro-mechanickej premeny v asynchrónnom motore

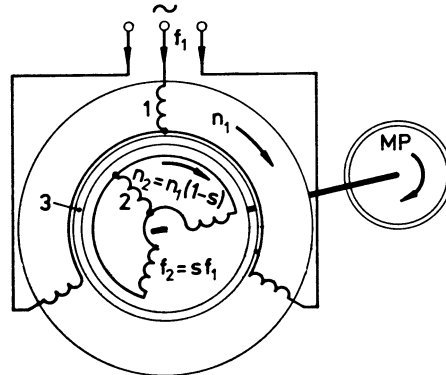
Činnosť asynchrónneho stroja vo funkcii motora je jednoduchá a dá sa vyjadriť nasledovne (pozri obr. 1). Trojfázové vinutie statora je pripojené na trojfázovú napájaciu sieť (E_1). Cievkami pretekajúce prúdy s fázovým natočením o 120° , vyvolávajú v magnetickom obvode (M) magnetické pole, ktoré sa otáča tzv. synchronnými otáčkami n_1 . Indukčné čiary magnetického poľa pretínajú vodiče oboch elektrických obvodov (E_1 a E_2) a teda indukujú v nich napätia. Indukované napätie v statorovom vinutí pôsobí proti indukujúcemu napätiu siete, čím vlastne obmedzuje statorové prúdy na hodnoty, pre ktoré je motor konštruovaný.

Indukované napätie v rotorovom vinutí (E_2) vyvoláva v ňom prúd a pretože je pod vplyvom magnetického poľa, pôsobí na vinutie mechanická sila ako na každý prúdovodič v magnetickom poli. Vodiče rotorového vinutia sa začnú vychýľovať v smere otáčania magnetického poľa (Lenzov zákon).

Pri postupnom narastaní otáčok sa bude znižovať relatívny pohyb vodičov rotora voči poľu statora, spomalí sa časová zmena magnetického toku viazaného vodičmi, zníži sa teda indukované napätie aj prúd, čoho výsledkom je aj zníženie mechanickej sily pôsobiacej na vodiče. Dochádza k ustáleniu otáčok rotora pod hodnotu synchronných. Preto tento motor sa nazýva asynchrónny alebo indukčný. Indukčný preto, že jeho pôsobenie je založené na indukovaní napätia v rotore od magnetického poľa vyvolaného statorom. Z uvedeného popisu stručný výsledok sa dá vysloviť takto: elektrická energia dodávaná zo siete do statora sa prostredníctvom vytvoreného otáčavého magnetického poľa prenáša na rotor a z toho v mechanickej forme na hriadeľ poháňaného zariadenia. Elektrický stroj pracuje ako asynchrónny motor (s otáčkami menšími ako sú synchronne), na hriadeľ rotora sa generuje hnací točivý moment.

Otáčavé magnetické pole, otáčky asynchrónneho motora

Názornejšia elektromagnetická schéma trojfázového asynchrónneho stroja je na obr. 2.



Obr. 2 Schéma trojfázového asynchrónneho stroja

Magnetický obvod zložený z dynamoplechov sa skladá z dvoch súosých valcov. Vnútorý valec – rotor je upevnený na hriadeli a otáča sa v ložiskách vo vnútri vonkajšieho valca – statora.

Statorové vinutie 1 je rovnomerne rozložené v drážkach statora, s fázovým posunutím voči sebe o 120° . Rotorové vinutie 2 je buď trojfázové alebo viacfázové a v najjednoduchšom prípade je spojené nakrátko. Z dôvodu dobrej magnetickej väzby medzi statorom a rotorom vzduchová medzera 3 má byť čo najmenšia. Ako sme už naznačili, ak vinutie statora pripojíme k zdroju trojfázového prúdu, tento vytvára magnetické pole. Pri danej priestorovej konfigurácii cievok vinutia a vlastnostiach trojfázového zdroja prúdu vytvorené magnetické pole sa pohybuje presne tak, ako keby sme okolo osi otáčali permanentný magnet. Preto sa nazýva otáčavé magnetické pole. Otáčavé pole indukuje v rotorovom vinutí elektromotorické napätie, ktoré v uzavretom vinutí vyvoláva prúdy. Tieto spolu s otáčavým magnetickým poľom generujú elektromagnetické sily, ktoré otáčajú rotor v smere otáčania poľa.

Ak striedavým prúdom vybudené magnetické pole po obvode statora má jeden severný a jeden južný pól (počet pólov stroja je $2p = 2$, teda počet pólových dvojíc, resp. polpárov stroja je $p = 1$), potom doba jedného kmitu prúdu zodpovedá otočeniu poľa o 360° . Ak je teda počet synchronných otáčok poľa za 1 minútu n_1 , zodpovedajúca frekvencia je

$$f_1 = \frac{n_1}{60} \quad [\text{Hz}; \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

čo je frekvencia statorového prúdu. Teda synchronne otáčky dvojpólového stroja pri sieťovej frekvencii 50 Hz sú

$$n_1 = 60 \cdot f_1 = 3000 \text{ ot. min}^{-1} \quad (2)$$

Synchronne otáčky s viac pólovými dvojicami sú

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (3)$$

Niektoré konkrétne hodnoty otáčok n_1 pri sieťovej frekvencii $f_1 = 50$ Hz a rôznom počte pólov stroja sú uvedené v nasledujúcej tabuľke

Počet pólov $2p$	Počet pólových dvojíc p	Synchronne otáčky	
		za sekundu (s^{-1})	za minútu (min^{-1})
2	1	50	3000
4	2	25	1500
6	3	16,67	1000
8	4	12,5	750
10	5	10	600
12	6	8,33	500

Ak v ustálenom stave otáčky rotora voči statoru označíme n_2 [s^{-1}], potom rozdiel

$$n_s = n_1 - n_2 \quad [s^{-1}] \quad (4)$$

definuje relatívne otáčky rotora voči otáčavému poľu statora. Nazývame ich **sklzové otáčky**. Sklzovým otáčkam zodpovedá frekvencia indukovaného napätia v rotorovom vinutí

$$f_2 = p \cdot n_s \quad [Hz; s^{-1}] \quad (5)$$

Sklzové otáčky zároveň definujú tzv. **sklz asynchrónneho stroja** ako ich pomer k synchronným otáčkam

$$s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (6)$$

odkiaľ skutočné otáčky rotora za 1 minútu s využitím vzťahu (3) sú

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad [min^{-1}] \quad (7)$$

Pretože asynchrónne stroje pracujú so sklzom $s \ll 1$, zo vzťahu (7) vyplýva, že otáčky rotora sú blízke synchronným. Hodnoty sklzu sa pohybujú v priemere okolo 5 %, pri najmenších motoroch býva okolo 10 %, pri najväčších okolo 1 %.

Ak je rotorové vinutie spojené, rovnako ním tečie trojfázový prúd, analogicky vytvárajúci otáčavé magnetické pole. Pole sa vzhľadom na rotor točí sklzovými otáčkami

$$n_s = \frac{60 \cdot f_2}{p} \quad [min^{-1}] \quad (8)$$

a vzhľadom na stator otáčkami

$$n_1 = n_s + n_2 \quad [min^{-1}] \quad (9)$$

Synchronne otáčky sú teda súčtom sklzových otáčok a otáčok rotora, resp. inými slovami obidve otáčavé polia sa sčítavajú do výsledného, spoločného magnetického poľa, ktoré sa otáča synchronnými otáčkami n_1 .

Ak ostatnú rovnicu vyjadríme pomocou frekvencií, dostaneme

$$\frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot f_2}{p} + n_2 \quad (10)$$

odkiaľ frekvencia rotora je

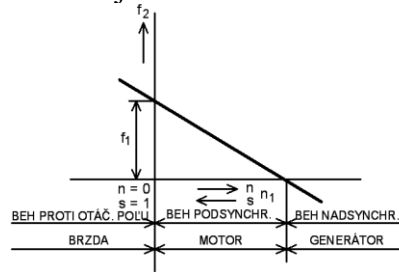
$$f_2 = f_1 - p \cdot \frac{n_2}{60} \quad [Hz; min^{-1}] \quad (11)$$

Pretože otáčky rotora n_2 môžu byť kladné alebo záporné (kladné pri otáčaní rotora v smere poľa, záporné pri otáčaní proti smeru poľa), frekvencia rotora môže byť vyššia alebo nižšia ako frekvencia napájacej siete. Asynchrónny stroj teda môže pracovať ako menič frekvencie.

Napokon, z rovnice (6) využitím (3) a (8) vyplýva, že

$$s = \frac{f_2}{f_1} \quad \text{resp.} \quad f_2 = s \cdot f_1 \quad (12)$$

Závislosť frekvencie f_2 od sklzu a otáčok je znázornená na obr. 3.

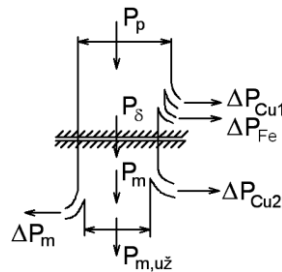


Obr. 3 Závislosť frekvencie rotora od sklzu a otáčok

Obr. 3 prehľadne znázorňuje tri základné prevádzkové stavy asynchrónneho stroja, t.j. vo funkcii motora, generátora a brzdy.

Energetická bilancia a účinnosť asynchrónneho motora

Energetickú bilanciu asynchrónneho motora vyjadrenú pomocou výkonu prehľadne znázorňuje obr. 4.



Obr. 4 Rozdelenie elektrického príkonu asynchrónneho motora

V súlade s označením na obr. 4, rovnica energetickej (výkonovej) bilancie je

$$P_p = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_m + P_{m,už} \quad [W] \quad (13)$$

Jednotlivé položky znamenajú:

- P_p je elektrický príkon motora, nakoľko je spotrebičom súmerne zaťažujúcim trojfázovú sieť, vyjadruje sa známym vzťahom

$$P_p = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (14)$$

pre fázové hodnoty napätia a prúdu statora U_1 , I_1 a účinník $\cos \varphi_1$.

- Prúd statora v jeho vinutí s odporom R_1 generuje elektrické straty

$$\Delta P_{Cu1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (15)$$

- ΔP_{Fe} predstavuje straty v železe statora, pozostávajúce zo strát hysteréznych a vírivými prúdmi

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v \quad (16)$$

Prostredníctvom otáčavého magnetického poľa na rotor sa teda prenáša výkon

$$P_{\delta} = P_p - \Delta P_{Cu1} - \Delta P_{Fe} \quad (17)$$

Nazýva sa **výkon vo vzduchovej medzere**, ktorý ak zanedbáme straty v železe rotora (sú malé) sa ďalej rozdeľuje na

- ΔP_{Cu2} , čo predstavuje elektrické straty vo vinutí rotora s odporom R_2 a napr. výkon spotrebovaný spúšťačom, resp. regulátorom otáčok (odpor R_{sp}). Teda

$$\Delta P_{Cu2} = 3 \cdot (R_2 + R_{sp}) \cdot I_2^2 \quad (18)$$

- a na mechanický výkon

$$P_m = P_{\delta} - \Delta P_{Cu2} \quad (19)$$

Ak od toho odčítame mechanické straty ΔP_m (trenie v ložiskách, ventilácia, ...) dostávame koncový, mechanický užitočný výkon na hriadeli motora

$$P_{m,už} = P_m - \Delta P_m \quad (20)$$

Z naznačenej bilancie jednoducho stanovíme účinnosť asynchrónneho motora

$$\eta = \frac{P_{m,už}}{P_p} = \frac{P_p - (\Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_m)}{P_p} \quad (21)$$

Treba zdôrazniť, že vzťah (21) vyjadruje celkovú, teda energetickú účinnosť elektromotora. Ak by sme chceli vyjadriť elektrickú účinnosť, potom vo vzťahu treba vynechať mechanické straty ΔP_m . Za normálneho stavu motora sú tieto podstatne menšie ako súčet $\Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu2}$, takže v konečnom výsledku môžeme považovať pri elektromechanickej premene energetickú účinnosť za elektrickú. Hodnoty účinnosti asynchrónnych motorov sa pohybujú v rozsahu 75 až 93 %.

Krútiaci moment asynchrónneho stroja

Medzi výkonom, otáčkami a krútiacim (točivým) momentom M platí všeobecný vzťah

$$P = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad (22)$$

v ktorom n sú otáčky za 1 sekundu. Pre vyjadrenie momentu asynchrónneho stroja je rozhodujúci výkon vo vzduchovej medzere, ktorý sa prenáša magnetickým poľom s otáčkami n_1 , teda v súlade s (22) platí konkrétne

$$P_{\delta} = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot M \quad [\text{W}; \text{s}^{-1}, \text{N.m}] \quad (23)$$

Elektrický výkon rotora sa prirodzene musí prenášať rovnakým momentom, ale inými otáčkami. Sú to otáčky poľa voči rotoru, t.j. sklzové n_s . Preto elektrický výkon v rotore (18) spotrebovaný formou strát je tiež ich funkciou:

$$\Delta P_{Cu2} = 2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot n_1 \cdot M = s \cdot P_{\delta} \quad (24)$$

Zvyšok elektrického výkonu rotora je celkový mechanický výkon na hriadeli motora (19), s otáčkami n_2 :

$$P_m = 2 \cdot \pi \cdot n_2 \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (1-s) \cdot M = (1-s) \cdot P_{\delta} \quad (25)$$

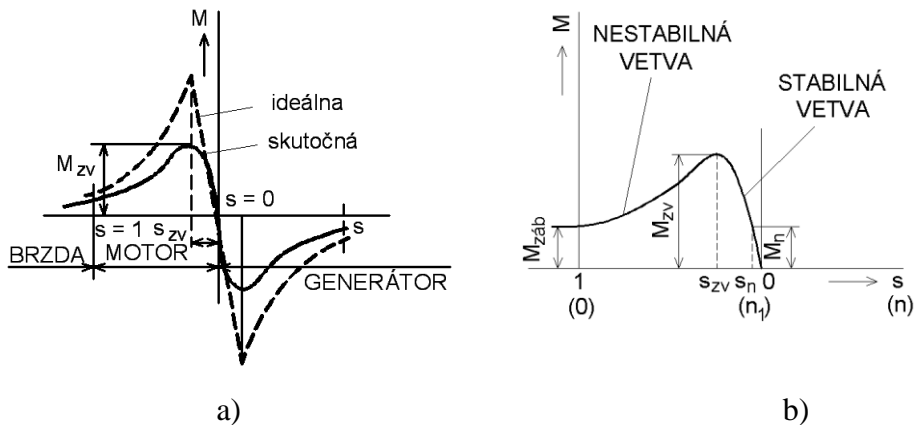
Z ostatných dvoch rovníc a rovnice (19) napokon dostaneme

$$P_{\delta} = P_m + \Delta P_{Cu2} = (1-s) \cdot P_{\delta} + s \cdot P_{\delta} \quad (26)$$

čo znamená, že rozdelenie výkonu vo vzduchovej medzere na mechanický a elektrický (na krytie strát ΔP_{Cu2}) závisí od sklzu. Sklz asynchrónneho stroja má byť preto čo najmenší.

Výpočet veľkosti krútiaceho momentu asynchrónneho stroja sa robí podľa vzťahu (23), v ktorom výkon vo vzduchovej medzere P_{δ} sa vypočítava z elektrických hodnôt náhradnej

schémy stroja. Ich vzájomnú súvislosť vyjadruje momentová charakteristika. Na obr. 5a je znázornená predmetná charakteristika asynchrónneho stroja.



Obr. 5 Závislosť momentu od sklzu: a) asynchrónneho stroja b) asynchrónneho motora

Podobne ako z priebehu funkcie $f_2 = f(s)$ (obr. 3) aj z obr. 5 vyplývajú 3 prevádzkové stavy asynchrónneho stroja. V rozsahu sklzu $0 < s < 1$ pracuje v podsynchronnom stave, teda vo funkcii motora. Motor nemôže dosiahnuť synchronné otáčky ($s = 0$), pretože v tomto stave relatívny pohyb rotora voči poľu by bol nulový, v jeho vodičoch by sa neindukovalo napätie, vodičmi by netiekol prúd, teda nepôsobila by ani mechanická sila, ktorá vyvoláva na hriadeli točivý moment. Vo funkcii generátora asynchrónny stroj bude pracovať vtedy, ak na rotor privedieme mechanickú energiu prostredníctvom pohonného stroja, ktorým sa rotor bude otáčať nadsynchronnými otáčkami ($n_2 > n_1$; $s < 0$). Mechanická energia rotora sa prostredníctvom magnetického poľa (elektromagnetickou indukciou) mení v statorovom vinutí na elektrickú formu, odkiaľ sa prenáša do siete. V porovnaní s motorom v generátore dochádza k zmene smeru toku energie, čo vyžaduje zmenu zmyslu relatívneho pohybu vodičov rotora voči točivému poľu. To sa práve dosahuje nadsynchronnými otáčkami asynchrónneho stroja (zmenou znamienka sklzu), ktorý v tomto stave vyvíja generátorový (brzdny točivý moment). Túto dvojsmernú premenu zúčastnených foriem premeny energie označujeme ako **princíp vratnosti elektrického stroja**.

Napokon tretí základný prevádzkový stav asynchrónneho stroja je vo funkcii brzdy. Nastáva vtedy, ak sa bremenom, ktoré treba brzdiť vnútra stroja otáčky proti zmyslu točivého poľa. Potom stroj vyvíja brzdny moment. V tomto stave je sklz $s > 1$ a otáčky rotora n_2 sú „záporné“ (opačný smer voči n_1).

Charakteristické body momentovej charakteristiky stroja pre stav motora sú naznačené na obr. 5b. V stave kľudu rotora ($s = 1$) stroj vyvíja záberový moment M_{zab} , ktorý má veľkosť 1 až 2,5-násobku menovitého momentu M_n . S týmto momentom sa motor rozbieha, otáčky n_2 sa zvyšujú, sklz klesá, moment rastie do hodnoty zvratu M_{zv} , čo je maximálny moment motora. Táto časť momentovej charakteristiky je nestabilná a prevádzka motora nežiadúca. Je to preto, že so zvýšením záťaže na hriadeli motora sa znížia otáčky n_2 , zvýši sklz, točivý moment klesá, až sa motor môže zastaviť. Stabilnou časťou charakteristiky je oblasť sklzu v hraniciach $s \in \langle s_{zv}; 0 \rangle$, v ktorej sa nachádza hodnota nominálneho momentu M_n . V hraniciach tejto vetvy charakteristiky s nárastom sklzu (poklesom n_2 zvýšenou záťažou na hriadeli), točivý moment rastie a motor sa nezastaví. Pomer momentu zvratu a nominálneho momentu sa nazýva momentová preťažiteľnosť, ktorá sa pohybuje okolo hodnoty 2.

Príklad 1

Asynchrónny trojfázový, štvorpólový ($2p = 4$) motor je pripojený na sieť s frekvenciou $f_1 = 50$ Hz. Určite synchronne otáčky točivého magnetického poľa statora n_1 (ot.min⁻¹), sklz rotora s , frekvenciu indukovaného rotorového prúdu f_2 a mechanickú uhlovú rýchlosť rotora ω , pokiaľ otáčky rotora $n = 1440$ ot.min⁻¹.

Riešenie:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04 \Rightarrow 4 \%$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1440}{60} = 150,8 \text{ s}^{-1}$$

$$f_2 = f_1 \cdot s = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ Hz}$$

Príklad 2

Asynchrónny trojfázový motor na napätie $U_s = 400$ V, $f_1 = 50$ Hz, má statorové vinutie zapojené do hviezdy, výkon $P = 7,5$ kW, nominálne otáčky $n = 1455$ ot.min⁻¹, účinnosť pri rešpektovaní všetkých strát $\eta = 86$ % a účinník $\cos \varphi = 0,88$. Určite počet pólov ($2p$) motora, sklz rotora s , príkon P_p , prúd I_1 a točivý moment M .

Riešenie:

Najbližšie vyššie synchronne otáčky točivého magnetického poľa statora n_1 , vzhľadom k otáckam rotora $n = 1455$ ot.min⁻¹, musia vyhovovať rovnici

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad \Rightarrow \quad \text{motor je štvorpólový } 2p = 4$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0,03 \Rightarrow 3 \%$$

$$P_p = \frac{P}{\eta} = \frac{7500}{0,86} = 8721 \text{ W}$$

Pri zapojení statorového vinutia do hviezdy, vypočítame prúd podľa vzťahu:

$$I_1 = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{8721}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,88} = 14,3 \text{ A}$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = \frac{7500}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1455}{60}} = 49,22 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Príklad 3

Asynchrónny trojfázový, dvojpólový motor je napájaný z frekvenčného meniča $f_1 = 60$ Hz. Určite výkon motora a Jouleove straty vo vinutí rotora ΔP_{j2} , pokiaľ má príkon $P_p = 2400$ W a otáčky $n = 3456$ ot.min⁻¹.

Riešenie:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3600 - 3456}{3600} = 0,04 \Rightarrow 4 \%$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 60}{1} = 3600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$P = (1-s) \cdot P_p = (1-0,04) \cdot 2400 = 2304 \text{ W}$$

$$\Delta P_{j2} = s \cdot P_p = 0,04 \cdot 2400 = 96 \text{ W}$$

Príklad 4

Asynchrónny trojfázový osempólový motor, ktorý je napájaný z frekvenčného meniča $f_1 = 40 \text{ Hz}$ má otáčky $n = 570 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Určite synchronne otáčky točivého magnetického poľa statora n_1 , sklz s , výkon P , Jouleove straty vo vinutí rotora ΔP_{j2} a účinnosť η , ak motor vykazuje točivý moment $M = 60 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Riešenie:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 40}{4} = 600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 570}{600} = 0,05 \Rightarrow 5 \%$$

$$P = M \cdot \omega = 60 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 570 = 3581,4 \text{ W}$$

$$P = (1-s) \cdot P_p \quad \Rightarrow \quad P_p = \frac{P}{1-s} = \frac{3581,4}{1-0,05} = 3769,9 \text{ W}$$

$$\Delta P_{j2} = s \cdot P_p = 0,05 \cdot 3769,9 = 188,5 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P}{P_p} = 1 - s = 1 - 0,05 = 0,95$$

Príklad 5

Asynchrónny trojfázový, štvorpólový motor má pri uvažovanom zaťažení príkon $P_p = 565 \text{ W}$, frekvenciu rotorového prúdu $f_2 = 1,5 \text{ Hz}$ a sklz $s = 0,05$. Určite frekvenciu napätia napájacieho zdroja f_1 , otáčky n , straty ΔP_{j2} , výkon P a točivý moment motora M .

Riešenie:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad \Rightarrow \quad f_1 = \frac{f_2}{s} = \frac{1,5}{0,05} = 30 \text{ Hz}$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 30}{2} = 900 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad \Rightarrow \quad n = n_1 \cdot (1-s) = 900 \cdot (1-0,05) = 855 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\Delta P_{j2} = s \cdot P_p = 0,05 \cdot 565 = 28,25 \text{ W}$$

$$P = (1-s) \cdot P_p = (1-0,05) \cdot 565 = 536,75 \text{ W}$$

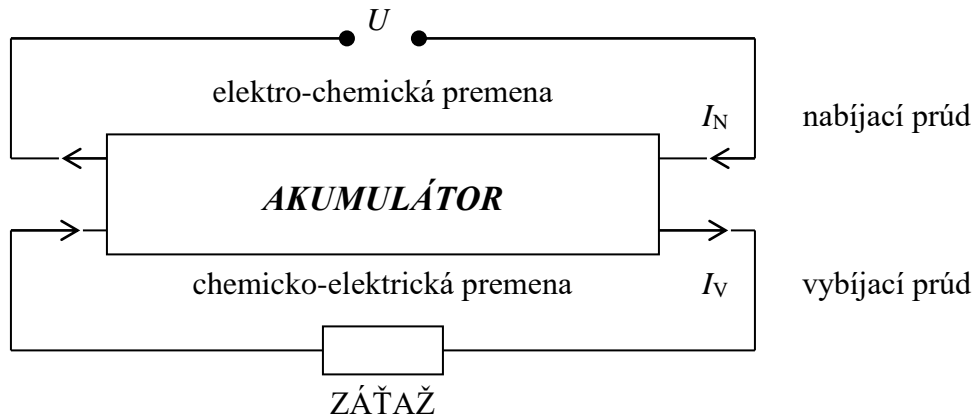
$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = \frac{536,75}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 855}{60}} \cong 6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Premena elektrickej energie na chemickú energiu

Premeny elektrickej energie na chemickú formu sa uskutočňujú prostredníctvom konverzných systémov, ktoré sa nazývajú:

- **elektrolyzéry** – premena elektro-chemická
- **galvanické články** – premena chemicko-elektrická

Elektrický akumulátor je reverzibilný zdroj jednosmerného prúdu. O režime akumulátora ako konverzného prvku rozhoduje smer prúdu, pretekaného v uzavretom elektrickom obvode (obr. 1)



Obr. 1 Pracovné režimy akumulátora

Objavy princípov elektrochemických dejov patria medzi najstaršie a spadajú do obdobia konca 18. storočia a 1. polovice 19. storočia (Galvani, Volta, Faraday).

1.1 Základné pojmy

Elektrolyty sú vodiče 2. triedy, pri ktorých prechodom prúdu sa ich fyzikálne vlastnosti a chemické zloženie menia (niektoré roztoky kyselín, zásad a solí kovov).

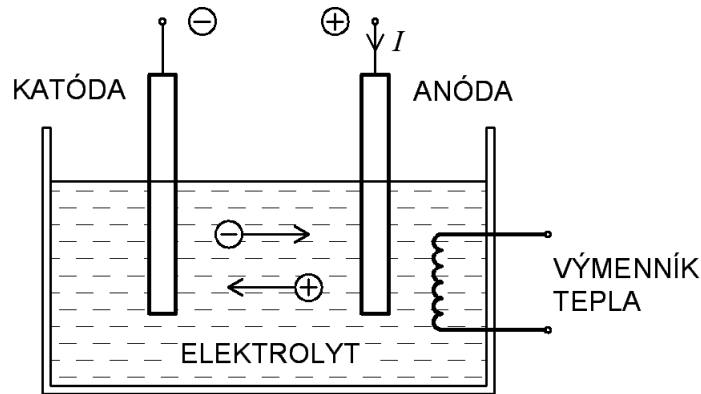
Disociácia – je proces rozpadu molekúl elektrolytu (molekuly elektrolytu v kvapalných rozpúšťadlách sa štiepia na kladné a záporné ióny).

Ak taký roztok elektrolytu cez systém elektród pripojíme na zdroj jednosmerného prúdu, vplyvom pôsobenia vytvoreného elektrického poľa jednotlivé ióny sa začnú pohybovať k elektródam s opačnou polaritou a na ich povrchu vylučovať.

Elektrolýza – je elektrochemický proces, pri ktorom vplyvom pôsobenia elektrického poľa (systém elektród pripojený na zdroj jednosmerného prúdu) sa začnú pohybovať jednotlivé ióny z roztoku elektrolytu k elektródam s opačnou polaritou a začnú sa na ich povrchu vylučovať. Uskutočňuje sa v elektrolyzéri, elektrolytickej vani minimálne s dvoma elektródami, **katódou** a **anódou**. Elektródy bývajú kovové alebo uhlíkové.

Elektrolyzér – zariadenie v ktorom sa uskutočňuje elektrolýza.

Medzi elektrolyty patria aj niektoré tuhé látky, ktoré sa roztavením prevedú do tekutého stavu. Ak roztavenie látky sa robí za účelom zmeny chemickej kvality, proces sa nazýva **termická elektrolýza** alebo elektrolýza tavením. Princíp elektrolýzy, resp. termickej elektrolýzy je naznačený na obr. 2.



Obr. 2 Princíp elektrolýzy

Elektrolytická disociácia alebo disociácia elektrolytu v roztoku je proces vzniku voľných iónov v roztoku elektrolytu, schopných sprostredkovať vedenie elektrického prúdu v tomto roztoku.

Vedenie elektrického prúdu roztokom alebo taveninou elektrolytu sprostredkováva usmernený pohyb kladných a záporných iónov v prítomnom elektrickom poli. Ión nesúci kladný elektrický náboj sa nazýva **katión**, teda v jednosmernom elektrickom poli sa bude pohybovať ku elektróde so záporným potenciálom, t.j. katóde. Naopak, ión, ktorý je nosičom záporného náboja sa nazýva **anión**. V tom istom poli sa pohybuje k elektróde s kladným potenciálom, t.j. **anóde**.

Náboj katiónu, resp. aniónu je vždy celistvým násobkom elementárneho náboja, ktorý zároveň udáva jeho mocenstvo. **Mocenstvo iónu** je celé kladné alebo záporné číslo vyjadrené podielom náboja iónu a elementárneho náboja $e = +1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Vyjadruje sa vzťahom

$$z = \frac{q}{e} \quad (1)$$

kde q je náboj iónu. Ióny teda môžu byť kladné jednomocné ($q = e$), kladné dvojmocné ($q = 2 \cdot e$), záporné jednomocné ($q = -e$), záporné dvojmocné ($q = -2 \cdot e$) atď.

1.2 Faradayove zákony elektrolýzy

Zásadný význam v celej elektrochémii majú zákony, ktoré formuloval M. Faraday už v 1. polovici 19. storočia. Vyjadrujú kvantitatívny vzťah medzi elektrickým nábojom prechádzajúcim elektrolytom a chemickými účinkami, ktoré vyvolal.

Na zopakovanie:

- **látkové množstvo** – je to množstvo chemicky rovnorodnej látky vyjadrené počtom elementárnych jedincov (atómov, iónov, molekúl, elektrónov, príp. iných častíc). Jednotkou látkového množstva je mól [mol] – čo je látkové množstvo sústavy, ktorá obsahuje práve toľko elementárnych jedincov, koľko je atómov v 0,012 kilograme uhlíka. Látkové množstvo sa stanovuje z podielu hmotnosti [kg] a mólovej hmotnosti látky [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$]

$$n = \frac{m}{M} \quad [\text{mol}] \quad (2)$$

- **mólová hmotnosť** (resp. molárna hmotnosť látky) – je hmotnosť jedného mólu danej látky. Zo vzťahu (2) vyplýva, že

$$M = \frac{m}{n} \quad [\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (3)$$

M. Faradayom formulované dva základné zákony elektrolýzy boli zistené experimentálne a patria medzi nemnohé empirické zákony, ktoré platia presne. Znejú:

1. Faradayov zákon – množstvo látky m [kg] vylúčenej alebo chemicky pozmenenej na elektróde je úmerné veľkosti náboja preneseného iónmi pri elektrolýze, t.j. matematicky

$$m = A \cdot Q = A \cdot \int_0^t I \cdot dt \quad [\text{kg}] \quad (4)$$

kde Q je náboj, ktorý prešiel roztokom elektrolytu [C]

A je konštanta, ktorá sa číselne rovná množstvu látky, ktoré sa vylúči, keď roztokom elektrolytu prejde náboj 1 C. Nazýva sa **elektrochemický ekvivalent látky** [kg.C⁻¹]

Voľne interpretované, podľa 1. Faradayovho zákona rovnaký **elektrický náboj vylúči alebo chemicky pozmení na elektróde vždy rovnaké množstvo tej istej látky.**

2. Faradayov zákon – rovnaký elektrický náboj vylúči z roztoku rôznych látok také množstvá, ktoré sú úmerné ich mólovým hmotnostiam. Ak má náboj veľkosť 1 C, potom podľa 1. zákona množstvo vylúčenej látky sa rovná jej elektrochemickému ekvivalentu A .

$$A = k \cdot M \quad [\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}] \quad (5)$$

kde k je konštanta úmernosti [mol.C⁻¹]

Dosadením (5) do (4) dostaneme všeobecný (zjednotený) Faradayov zákon

$$m = k \cdot M \cdot Q \quad (6)$$

z ktorého vyplýva, že na vylúčenie mólovej hmotnosti ľubovoľnej látky ($m = M$) sa spotrebuje vždy rovnaké množstvo náboja $Q_0 = 1/k$. Toto množstvo elektrického náboja sa nazýva Faradayov náboj alebo Faradayova konštanta F . Z rovnice (6) s využitím (3) sa dá vypočítať veľkosť Faradayovho náboja

$$Q_0 = \frac{1}{k} = F = \frac{Q}{\frac{m}{M}} = \frac{Q}{n} = 96490 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (7)$$

Dosadením (7) do (6) dostaneme iný tvar všeobecného Faradaovho zákona

$$m = M \cdot \frac{Q}{F} = M \cdot \frac{I \cdot t}{F} \quad (8)$$

pri konštantnej intenzite elektrického prúdu I .

1.3 Prúdový a energetický výťažok procesov elektrolýzy

V reálnych elektrolytických procesoch množstvá látok vylúčených na elektródach sú iné, ako vypočítané podľa 1. Faradayovho zákona (4). Odlišnosť nespočíva v nepresnosti zákona, ale je spôsobená tým, že na elektródach sa uskutočňujú aj ďalšie sekundárne procesy, spotrebujúce časť dodávanej elektrickej energie. Táto skutočnosť sa vyjadruje účinnosťou primárneho procesu, ktorú pri elektrolýze zvykneme nazývať **prúdovým výťažkom**.

Je definovaný pomerom:

$$\eta_I = \eta_Q = \frac{Q_t}{Q_{sk}} = \frac{I_t}{I_{sk}} < 1 \quad (9)$$

v ktorom Q_t , resp. I_t je teoretická veľkosť náboja [C], resp. prúdu [A] vypočítaná podľa (4)
 Q_{sk} , resp. I_{sk} je skutočná veľkosť náboja, resp. prúdu, potrebná na vylúčenie rovnakej hmotnosti látky so zohľadnením prídavných procesov

S ohľadom na 1. Faradayov zákon (4) prúdový výťažok sa dá vyjadriť aj takto

$$\eta_Q = \eta_m = \frac{m_{sk}}{m_t} < 1 \quad (10)$$

čo znamená, že v skutočných procesoch na elektróde sa vylúči menej látky (m_{sk}) v porovnaní s teoretickou hmotnosťou (m_t). Takto stanovenú účinnosť primárneho procesu môžeme nazývať **hmotnostným (alebo materiálovým) výťažkom elektrolýzy**.

Energetický výťažok η_w vyjadruje celkovú energetickú účinnosť η_{en} procesu elektrolýzy a definuje sa podielom elektrickej energie W_t , ktorá je teoreticky potrebná k výrobe buď hmotnostnej jednotky čistého tuhého alebo kvapalného produktu (napr. 1 t) alebo objemovej jednotky čistého plynu (napr. 1 m³), meraných za normálnych podmienok a elektrickej energie W_{sk} , v skutočnosti pri tejto výrobe spotrebovanej. Teda

$$\eta_w = \eta_{en} = \frac{W_t}{W_{sk}} = \frac{Q_t}{Q_{sk}} \cdot \frac{U_t}{U_s} = \eta_I \cdot \eta_U < 1 \quad (11)$$

Ak η_I je prúdový výťažok podľa (9), potom rozdiel $(1 - \eta_I)$ udáva, aký veľký podiel z celkového množstva vynaloženej elektriny (náboja) sa znehodnocuje vedľajšími elektrochemickými procesmi, chemickou rekombináciou a pod. Všeobecne prúdové výťažky na anóde a katóde nie sú pre vedľajšie procesy rovnako veľké. V praxi sa prúdový výťažok obyčajne vzťahuje len na primárny, hlavný produkt (pri zvolenom príklade buď na luh alebo chlór) podľa toho, ktorý je z hľadiska odbytu dôležitejší.

V ostatnej rovnici U_s označuje skutočne zmerané jednosmerné napätie na jednom elektrolyzéri vrátane úbytku na privodoch a U_t je teoretická veľkosť napätia na danej sústave. Je totožná s tzv. **rovnovážnym napätím**, ktoré sa vypočíta buď z termodynamických údajov sústavy alebo z hodnôt elektródových potenciálov. Podiel U_t/U_s sa zvykne nazývať **napäťovým výťažkom** (v praxi ako hodnotiace kritérium sa používa málo). Rozdiel $U_s - U_t$ je spôsobený polarizačnými dejmi na elektródach a ohmickým odporom elektrolytu, diafragmy, vodičov a spojov.

Za základné ukazovatele elektrolytickej výroby sa v praxi považujú:

- prúdové výťažky η_I
- napätie na elektrolyzéri U_s
- merná spotreba elektrickej energie [kWh.t⁻¹, resp. kWh.m⁻³]

1.4 Priemyselné využitie elektrolýzy a energetická náročnosť elektrolytických procesov

Ako sme už poznamenali v úvode kapitoly, elektrolytické procesy majú široké použitie, presahujúce rámec „vyslovene“ chemických technológií, do ktorých patrí najmä výroba rôznych anorganických látok. Elektrolýza sa intenzívne využíva aj v iných priemyselných odvetviach. V hutníctve, konkrétne v elektrometalurgii prostredníctvom tzv. **hydrometalurgických technológií** sa vyrábajú rôzne kovy prítomné v roztokoch elektrolytov alebo sa rafinujú kovy predtým vyrobené bežným hutníckym (pyrometalurgickým) spôsobom. Elektrolýza je tiež výrobnou bázou **galvanotechniky**, používanej mimo iného v elektrotechnickom priemysle. Galvanizáciou sa rozumie pokovovanie povrchov nekovových alebo menej kvalitných kovových predmetov za účelom zlepšenia fyzikálno-chemických vlastností vrátane ochrany proti korózii. Pre priemysel každej krajiny je rovnako významná elektrolýza tavením. Na ilustráciu využitia elektrolýzy uvedieme niekoľko príkladov.

1. **Elektrolytická rafinácia kovov** – čo je elektrolýza vodných roztokov elektrolytov s využitím hydrometalurgických procesov. Je to veľmi rozšírený spôsob výroby čistých kovov, v ostatných rokoch až 80 %, takých kovov sa získava práve elektrolytickou rafináciou a nie z jednotlivých rúd. Typickým príkladom je elektrolytická rafinácia medi, pri ktorej sa z hutnickeho medziproduktu (tzv. čiernej medi) získava čistá elektrolytická meď s obsahom až 99,98 % Cu.

Elektrolýza prebieha v elektrolýzéri tégľového tvaru, elektrolytom je vodný roztok síranu meďnatého. Anóda je z hutnickej medi, katódou sú tenkostenné plechy z elektrolytickej medi. V priebehu elektrolýzy sa anóda rozpúšťa, na katóde sa vylučuje čistá meď. Hustota prúdu na katóde sa pohybuje v hraniciach 160 až 350 A.m⁻². Čím je hustota prúdu menšia, tým kvalitnejšia je vylúčená elektrolytická meď a tým menšia je merná spotreba elektrickej energie. Býva 165 až 350 kWh.t⁻¹ vylúcenej medi. Prúdový výťažok je 0,9 až 0,98 %. Analogickou technológiou sa rafinuje tiež nikel, kobalt, olovo, striebro, zlato a ďalšie kovy.

2. **Galvanizácia** – je elektrolytický proces, ktorý podľa účelu sa delí na galvanostégiu a galvanoplastiku.

Galvanostégia je galvanické pokovovanie povrchov menej kvalitných kovov, prípadne po špeciálnej úprave aj povrchov nekovových predmetov. Predmet, ktorý sa má pokovovať, tvorí katódu, anódou je spravidla doska z kovu, ktorým sa má pokovovať. Elektrolytom musí byť roztok kyseliny, zásady alebo soli tohto kovu. Hustota prúdu na katóde má byť relatívne malá, aby kov pokrýval predmet rovnomerne. Pohybuje sa v desiatkach A.m⁻², len ojedinele je vyššia (napr. pri poniklovaní predmetov býva 300 A.m⁻², pri pochromovaní okolo 150 A.m⁻², ale pri postriebrovaní len 30 A.m⁻²). Galvanostégia sa bežne využíva v slaboprúdovej elektrotechnike, v zlatníctve, bižutérii, pri výrobe optických prístrojov a pod.

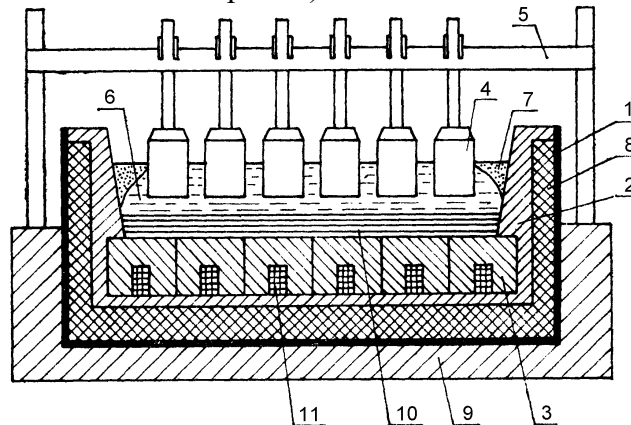
Galvanoplastika – je zhotovenie odliatkov rôznych predmetov elektrolytickou cestou. Napr. model zo sadry sa natrie tenkou vrstvou grafitu a s týmto vodivým povrchom sa ponorí do elektrolytu ako katóda. Na nej sa elektrolyticky vylúči potrebná vrstva žiadaného kovu, napr. medi. Anódou je v tomto prípade Cu-doska, elektrolytom roztok modrej skalice (CuSO₄). Pri dostatočne hrubej vrstve medi na katóde, táto sa od nej odlúpne a tak dostaneme verný odliatok pôvodného modelu. Galvanoplastika sa využíva pri výrobe odliatkov gramofónových platní, drobných umeleckých predmetov a najmä v polygrafii na výrobu tlačových foriem.

3. **Elektrolýza tavenín** – je to druh elektrolýzy, pri ktorej elektrolytom je roztavený polotovar, soľ obsahujúca vyrábaný kov. Využíva sa pri výrobe elektronegatívnych (spravidla alkalických) kovov. Roztavené soli sú najmä rôzne fluoridy alebo chloridy. Príprava soli do

roztaveného stavu a jej udržanie na teplote taveniny v elektrolyzéri sa zabezpečuje tým istým prúdom ako pre vlastný proces elektrolýzy. Preto túto elektrolýzu nazývame tiež **termickou elektrolýzou**. Termická elektrolýza je teda kombinácia tepelných a elektrochemických procesov. Pracovná teplota termickej elektrolýzy (roztavených solí) sa pohybuje v hraniciach 400 až 960 °C, výnimočne aj viac. Preto aj kov vylučovaný na katóde je spravidla v roztavenom stave. Termická elektrolýza sa využíva najmä v hutníctve, na výrobu kovového sodíka, hliníka, horčíka, tiež lítia a fluóru. Energetická náročnosť týchto technológií patrí medzi najvyššie.

Termická elektrolýza sa najviac využíva pri **výrobe hliníka**. Elektrolytom je oxid hliníka Al_2O_3 (bauxit), s teplotou tavenia okolo 2050 °C. Ak sa ale rozpustí v roztavenom kryolite (čo je fluorid hlinito-sodnatý, Na_3AlF_6), elektrolýza a vylučovanie hliníka prebieha už pri teplote okolo 950 až 980 °C. Koncentrácia Al_2O_3 v roztavenom kryolite je 3 až 10 %.

Termický elektrolyzér na výrobu hliníka je znázornený na obr. 3. Tvorí ho ocelový plášť elektrolytickej vane (1), ktorá je uložená na betónovom základe (9). Na obmedzenie tepelných strát slúži šamotová výmurovka (8), zakrytá uhlíkovými blokmi (2) a pôdnymi katódami z grafitu (3). Spojenie katód so zdrojom jednosmerného prúdu zabezpečujú masívne príklady (11). Prívod prúdu na anódy (4) zabezpečujú prípojnice (5) z Cu-pásoviny. Anódy sú vertikálne a pohyblivé, aby sa dala nastavovať konštantná vzdialenosť medzi nimi a katódovou sústavou, nakoľko hrúbka vylúčenej hliníkovej vrstvy (10) sa v priebehu elektrolýzy zväčšuje. Normálne býva 100 až 150 mm. Anódy sú buď grafitové alebo tzv. samovypaľovacie na báze uhlíka (Söderbergerové elektródy), požadovanou časťou ponorené do elektrolytu (6). Po okrajoch vane (7) tento zvykne kôrovatieť (tuhnúť v miestach s nižšou teplotou).



Obr. 3 Schéma termického elektrolyzéra na výrobu hliníka

Proces termoelektrolýzy hliníka prebieha pri napätí 4,5 až 5 V a hustote prúdu 8 až 60 $\text{kA}\cdot\text{m}^{-2}$. Celkové napätie na sústave elektrolyzéroov (zapojených do série) sa pohybuje okolo 250 až 700 V, celkový prúd prechádzajúci sústavou paralelne zapojených elektród v jednej vane dosahuje desiatky kA. Elektrická účinnosť je 0,8 až 0,9, energetická len okolo 0,3 (veľké tepelné straty). Merná spotreba elektrickej energie pri elektrolytickej výrobe hliníka býva 17500 až 19500 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ Al a patrí medzi najvyššie.

Termickou elektrolýzou sa tiež vyrába **horčík**. Do šamotom vyloženej vane vyplnenej taveninou MgCl_2 sú zapustené grafitové anódy a ocelové katódy. Priestor medzi katódami a anódami je rozdelený šamotovou diafragmou, chrániacou na katóde vylúčený horčík (zhromaždený na hladine taveniny elektrolytu) pred vplyvom plynného chlóru, anódového

produktu. Pracovná teplota procesu je okolo 720 °C, napätie na jednom elektrolyzéri 7 až 8,5 V, merná spotreba elektrickej energie 18000 až 26000 kWh.t⁻¹ horčíka.

Pri výrobe fluóru s kyslým fluoridom draselným KF.HF ako elektrolytom je pracovná teplota asi 250 °C, merná spotreba elektrickej energie okolo 12000 kWh.t⁻¹ fluóru. Ak je elektrolytom kyslý fluorid draselný v zložení KF.2HF pracovná teplota je 75 °C (resp. 115 °C) a merná spotreba 21000 (resp. 14000) kWh.t⁻¹ fluóru.

Energeticky najnáročnejšia je **termoelektrolýza lítia**. Je to elektrolýza LiCl₂ v tavenine obsahujúcej 50 % hmotnostných jednotiek LiCl a 50 % KCl. Merná spotreba elektrickej energie dosahuje 40000 až 60000 kWh.t⁻¹ lítia. Prevádzkové napätie je 8 až 13 V na jednom elektrolyzéri.

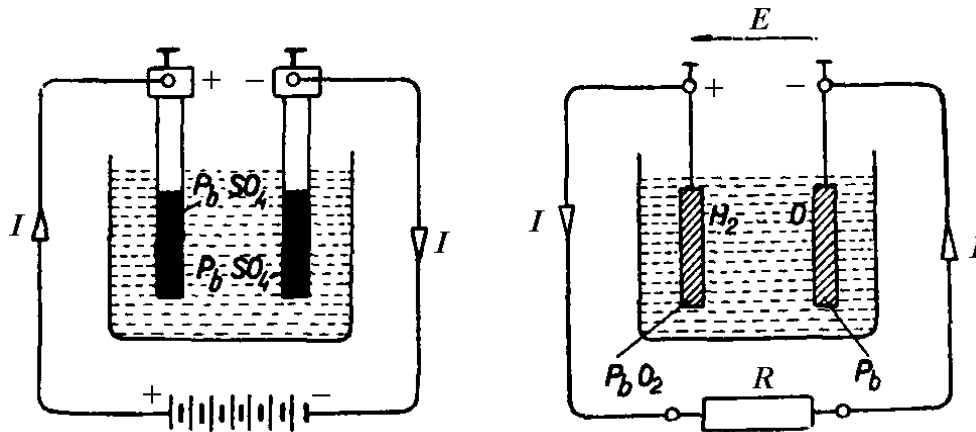
4. **Elektrolytické obrábanie kovov** – je to novodobý spôsob opracovania kovových súčiastok odoberaním materiálu elektrochemickým rozpúšťaním. Obrábací nástroj tvorí katódu, obrobok anódu, priestor medzi nimi sa intenzívne preplachuje elektrolytom. Vplyvom jednosmerného prúdu na katóde sa uvoľňujú vodíkové ióny, na anóde (obrobku) kov stráca elektróny, ktorých počet zodpovedá jeho mocenstvu. Tieto sa dostávajú do elektrolytu, reagujú s jeho zložkami a vytvárajú odpadové produkty. Rýchlosť obrábania závisí od hustoty prúdu, napr. pri elektrochemickom hĺbení býva do 100 A.cm⁻², pri napätí 8 až 15 V. Hustota prúdu a rýchlosť obrábania je najväčšia v mieste najmenej vzdialenosti medzi elektródami. Tým sa prekopíruje tvar katódy do anódy, t.j. tvar nástroja do obrobku. Výhodou elektrochemického obrábania je vysoká produktivita a skutočnosť, že z nástrojovej elektródy neubúda, na obrobku nevzniká tepelne ovplyvnená vrstva.

Okrem elektrochemického hĺbenia ďalšími metódami obrábania je napr. elektrochemické leštenie, brúsenie, značkovanie, leptanie a ďalšie procesy.

1.5 Princíp akumulátora

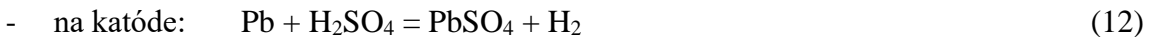
Akumulátor je reverzibilný zdroj jednosmerného prúdu, ktorého činnosť je založená na vratnosti elektrochemických procesov v elektrolýze. Rozklad roztoku elektrolytu, ktorý vzniká pri určitom smere prúdu sa zastaví a nastáva reverzné zlučovanie opačne nabitých iónov, ak sa smer prúdu zmení. Ak má prúd taký smer, že pôsobí proti polarizačnému napätiu na elektródach, v sústave elektrolyt–elektródy sa mení elektrická energia na tepelnú, podobne ako pri elektrolýze. Akumulátor je elektrolyzérom, chemickú energiu získava prostredníctvom nabíjacieho prúdu z vonkajšieho zdroja. Naopak, ak prúd elektrolytom je vyvolaný polarizačným napätím, v sústave prebieha inverzný proces, t.j. chemická energia sa mení na elektrickú. Akumulátor je vo funkcii galvanického článku, elektrická energia sa získava z „vnútorného“ zdroja prostredníctvom vybíjacieho prúdu, tečúceho obvodom záťaže.

Vratnosť elektrochemických procesov znázorníme na najbežnejšom type akumulátora, olovenom. Roztokom elektrolytu je riedená kyselina sírová, anódu tvorí doska z oxidu olovičitého (PbO₂), katódou je doska z hubovitého olova (Pb). Elektrochemické procesy v tomto akumulátore prebiehajú v nasledujúcom poradí (obr. 4)



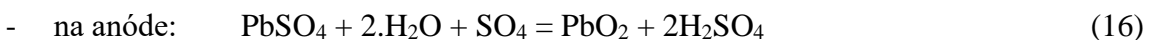
Obr. 4 Nabíjanie a vybíjanie akumulátora

- **stav pred nabíjaním** – pôsobením kyseliny sírovej obe elektródy sa pokrývajú vrstvou síranu olovnatého, čomu zodpovedajú stechiometrické rovnice:



t.j. uvoľnený vodík na katóde následne reaguje na anóde a vytvára dve molekuly vody. Obe elektródy sú chemicky rovnaké, akumulátor nevykazuje žiadne napätie

- **nabíjací proces** (obr. 4a) – pripojením vonkajšieho zdroja na svorky akumulátora (kladný pól na anódu PbSO_4 , záporný na katódu Pb), nabíjací prúd v elektrolyte uvoľňuje ióny H_2 , ktoré sa vylúčia na katóde a ióny SO_4 , vylučujúce sa anóde. Nabíjacímu procesu zodpovedajú stechiometrické rovnice:



čo znamená, že rozkladom jednej molekuly kyseliny sírovej vznikajú tri nové molekuly rovnakého druhu, hustota kyseliny sírovej v roztoku elektrolytu stúpa. Pred nabíjaním chemicky rovnaké elektródy po nabití majú novú kvalitu, anódu z PbO_2 a katódu z Pb . Vytvoril sa galvanický článok.

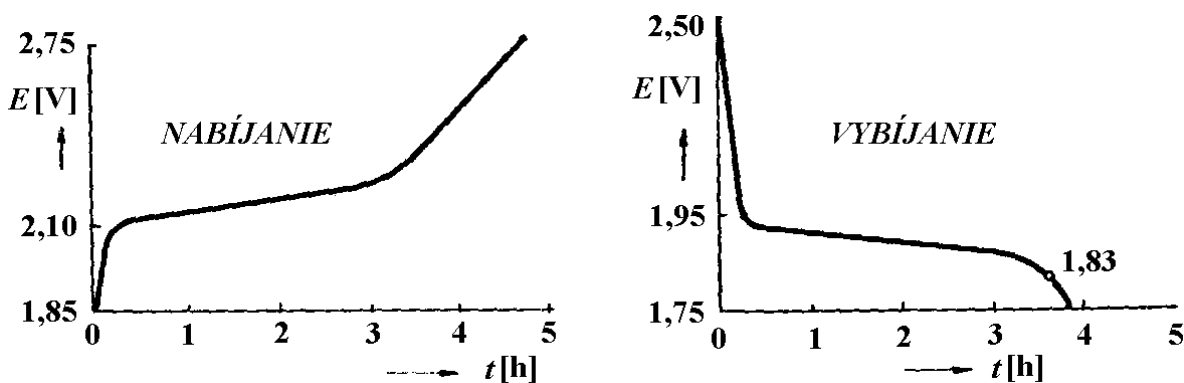
- **vybíjací proces** (obr. 4b) – ak na takto vytvorený galvanický článok pripojíme záťaž, preteká obvodom prúd opačného smeru, s rovnakým elektrochemickým účinkom, teda elektrolyt sa znova rozkladá na ióny H_2 a SO_4 (14). Stechiometrické rovnice vybíjania akumulátora sú:





Z dvoch molekúl H_2SO_4 vznikajú dve molekuly vody, hustota elektrolytu klesá, elektródy nadobúdajú rovnakú chemickú povahu, akumulátor stráca napätie, dostáva sa do stavu pred nabíjaním. Aby znovu získal chemickú energiu musíme mu dodať elektrickú z vonkajšieho zdroja. Reverzibilný proces sa opakuje.

Na obr. 5 sú zobrazené nabíjacie a vybíjacie charakteristiky oloveného akumulátora. Napätové rozpätie medzi dvoma doskami akumulátora, ako elektrického zdroja, býva od 2 V do 1,83 V. Potom rýchlo klesá až k nule, preto po dosiahnutí spodnej hranice treba akumulátor znova nabíjať.



Obr. 5 Priebeh napätia počas nabíjania a vybíjania akumulátora

Počet dosiek akumulátora sa odvodzuje od požadovaného svorkového napätia.

Kvalita (výkonnosť) akumulátorov sa vyjadruje ich kapacitou, čo je množstvo elektrickej energie v ampérhodinách, ktoré akumulátor poskytuje bez toho, aby napätie pokleslo pod dovolenú hodnotu 1,83 V.

$$W_a = I \cdot t \quad [\text{Ah}] \quad (19)$$

Účinnosť akumulátorov sa spravidla určuje dvojako, buď pomerom

$$\eta_{\text{Ah}} = \frac{I_v \cdot t_v}{I_n \cdot t_n} \quad [-] \quad (20)$$

alebo

$$\eta_{\text{Wh}} = \frac{U_v \cdot I_v}{U_n \cdot I_n} \quad [-] \quad (21)$$

čo je ampérhodinová alebo wathodinová účinnosť (indexy „v“ sa vzťahujú na vybíjací proces, indexy „n“ na nabíjací). Nové akumulátory majú η_{Ah} okolo 90 % a η_{Wh} približne 70 až 75 %.

Príklad 1

Aké množstvo elektrického náboja potrebujeme viesť roztokom CuSO₄, aby sa vylúčilo 3,32 g Cu? (predpokladajte 2-mocnú meď (oxidačné číslo = 2) a $M_{\text{Cu}} = 63,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)

Riešenie:

Podľa Faradayových zákonov sa nábojom 96490 Coulombov vylúči v prípade dvojmocej medi $\frac{1}{2}$ 63,5 g.

Teda:

$$63,5 \text{ g Cu} \dots\dots\dots 2 \cdot 96490 \text{ C}$$

$$3,32 \text{ g Cu} \dots\dots\dots Q$$

$$Q = \frac{\text{oč} \cdot m \cdot F}{M_{\text{Cu}}} = \frac{2 \cdot 3,32 \cdot 96490}{63,5} = 10089,7 \text{ C}$$

Príklad 2

Koľko gramov Cu získame z roztoku CuSO₄, keď ním 20 minút prechádza prúd 5 A? (predpokladajte 2-mocnú meď (oxidačné číslo = 2) a $M_{\text{Cu}} = 63,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)

Riešenie:

Náboj je

$$Q = I \cdot t$$

Ak

$$I = 5 \text{ A}$$

$$t = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$$

dostaneme

$$Q = I \cdot t = 5 \cdot 1200 = 6000 \text{ C}$$

Nábojom 96490 C sa získa 31,75 g Cu (vid' **Príklad 1**).

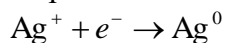
$$m = \frac{M_{\text{Cu}} \cdot Q}{\text{oč} \cdot F} = \frac{63,5 \cdot 6000}{2 \cdot 96490} = 1,97 \text{ g Cu}$$

Príklad 3

Vedením prúdu roztokom striebornej soli sa na katóde za 10 minút vylúči 1 g Ag. Vypočítajte intenzitu prúdu! (predpokladajte 1-mocné striebro (oxidačné číslo = 1) a $M_{\text{Ag}} = 107,87 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)

Riešenie:

Na katóde prebieha reakcia:



$$t = 10 \text{ minút} = 600 \text{ s}$$

$$m_{\text{Ag}} = 1 \text{ g}$$

$$M_{\text{Ag}} = 107,87 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$F = 96490 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Potom platí: $m_{\text{Ag}} = \frac{M_{\text{Ag}} \cdot I \cdot t}{F}$

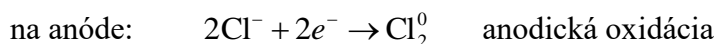
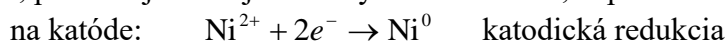
vyjadríme intenzitu a dosadíme hodnoty: $I = \frac{\text{oč} \cdot m_{\text{Ag}} \cdot F}{M_{\text{Ag}} \cdot t} = \frac{1 \cdot 1 \text{ g} \cdot 96490}{107,87 \cdot 600} = 1,49 \text{ A}$

Príklad 4

Roztokom NiCl_2 prechádzal prúd 2 A po dobu 3 hodín. Vypočítajte hmotnosť kovu, vylúčeného na katóde a objem plynu (za normálnych podmienok), vznikajúceho na anóde. (predpokladajte 1-mocný chlór (oxidačné číslo = 1) a 2-mocný nikel (oxidačné číslo = 2) a $M_{\text{Cl}} = 35,45 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_{\text{Ni}} = 58,71 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $V_{0,\text{Cl}_2} = 22,42 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$)

Riešenie:

Reakcie, prebiehajúce na jednotlivých elektródach, napíšeme rovnicami:



Podľa spojeného Faradayovho zákona $m = \frac{A \cdot I \cdot t}{n \cdot F}$, kde $t = 3 \text{ hod} = 10800 \text{ s}$

$$m_{\text{Ni}} = \frac{58,71 \cdot 2 \cdot 10800}{2 \cdot 96490} = 6,571 \text{ g Ni}$$

$$m_{\text{Cl}_2} = \frac{(2 \cdot 35,45) \cdot 2 \cdot 10800}{2 \cdot 96490} = 7,936 \text{ g Cl}_2$$

Hmotnosť chlóru odpovedá objemu

$$V = \frac{V_{0,\text{Cl}_2} \cdot m_{\text{Cl}_2}}{M_{\text{Cl}_2}} = \frac{22,42 \cdot 7,936}{70,9} = 2,51 \text{ dm}^3$$

Príklad 5

Koľko mg AgNO_3 sa rozloží elektrickým množstvom náboja 1 Coulombu? [1,76 mg AgNO_3]

Príklad 6

Pri elektrolýze roztoku CuSO_4 sa na anóde vylúčilo 448 ml kyslíka za normálnych podmienok. Koľko CuSO_4 sa rozložilo? [6,384 g CuSO_4]

Príklad 7

Koľko Coulombov treba viesť roztokom striebornej soli, aby sa z roztoku vylúčil 1 gram striebra? [894,59 C]

Príklad 8

Koľko gramov niklu sa vylúči pri galvanickom pokovovaní, keď pokovovacím kúpeľom prejde 1600 coulombov? [0,4867 g Ni]