Spolufinancováno Evropskou unií

Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

Problematika provozu vodíkových technologií

Ing. Filip Krupa, Ph.D.

Workshop
Aplikace umělé inteligence a kvantového počítání v energetice II

projekt „Zvýšení odolnosti energetických sítí v kontextu dekarbonizace, decentralizace a udržitelného socioekonomického rozvoje“
CZ.02.01.01/00/23_021/0008759
OPERAČNÍ PROGRAM JAN AMOS KOMENSKÝ

26. 10. 2026



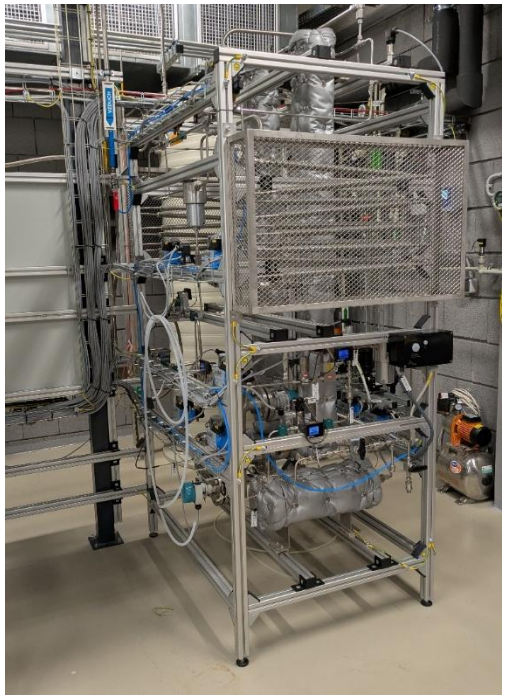
LABORATOŘ VODÍKOVÝCH TECHNOLOGIÍ













ELEKTROLYZÉRY

ACTA AES 1000

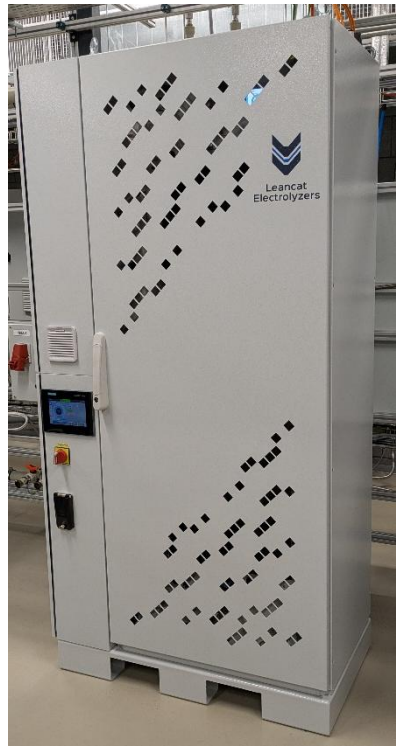
- Technologie AEM: aniontově výměnná membrána, transport iontů OH^-.
- Výrobce: ACTA S.p.A. (Enapter AG)
- Čtyři stacky po 19 článcích, každý s produkcí přibližně 250 Nl H_2/h.
- Čistota vodíku: 99,99 %.
- Pracovní teplota 45 °C, maximální tlak H_2 35 bar.
- Elektrolyt: demineralizovaná voda s 1% přídavkem směsi K_2CO_3 a $KHCO_3$ v poměru 2 : 1.
- Samostatné napájení jednotlivých stacků, měření a řízení proudu a napětí.





H2Gem

- Technologie PEM: protonově výměnná membrána.
- Produkce: 1–6 Nm^3/h
- Čistota vodíku: 99,99 %
- LEANCAT ELECTROLYZERS s.r.o.
- Modulární konstrukce: až šest elektrolytických modulů PEMWE 1000.
- Pracovní tlak H_2 10–35 bar(g); beztlaký výstup kyslíku.
- Pracovní teplota stacku 30–75 °C, kapalinové chlazení přes výměník.
- Demineralizovaná voda s kontrolou vodivosti, integrovaná dvoukolonová sušička H_2.
- Řízení přes PLC a PROFINET: vzdálené zadávání příkonu, start/stop a přenos provozních údajů.

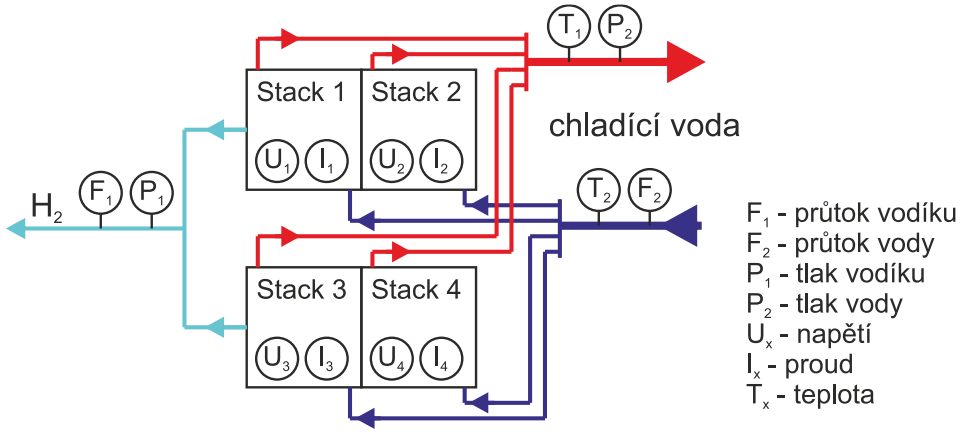


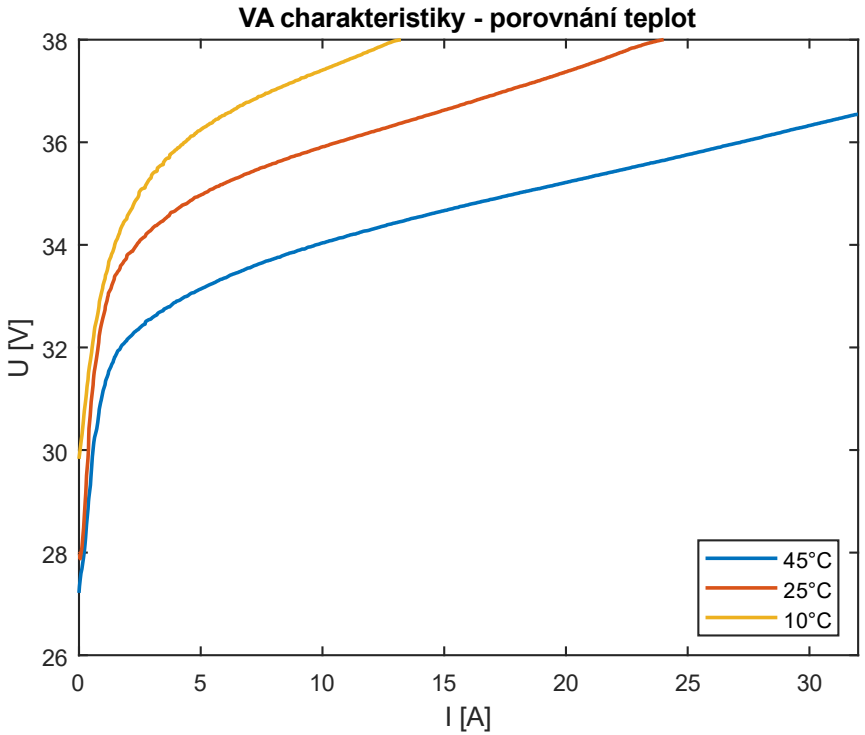


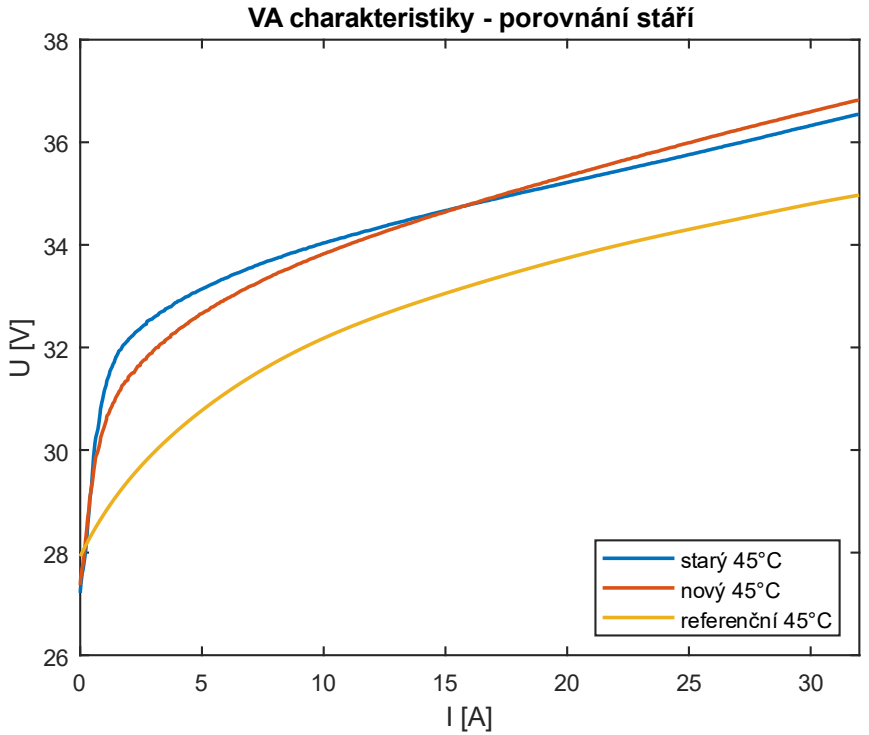


ELEKTROLYZÉRY – VA CHARAKTERISTIKY

- VA charakteristiky AEM stacku v proudovém rozsahu přibližně 0–32 A.
- Porovnání teplot 10, 25 a 45 °C.
- Porovnání staršího a nového stacku s referenční charakteristikou při 45 °C.
- Podklad pro parametrizaci modelu a sledování změn provozních charakteristik.

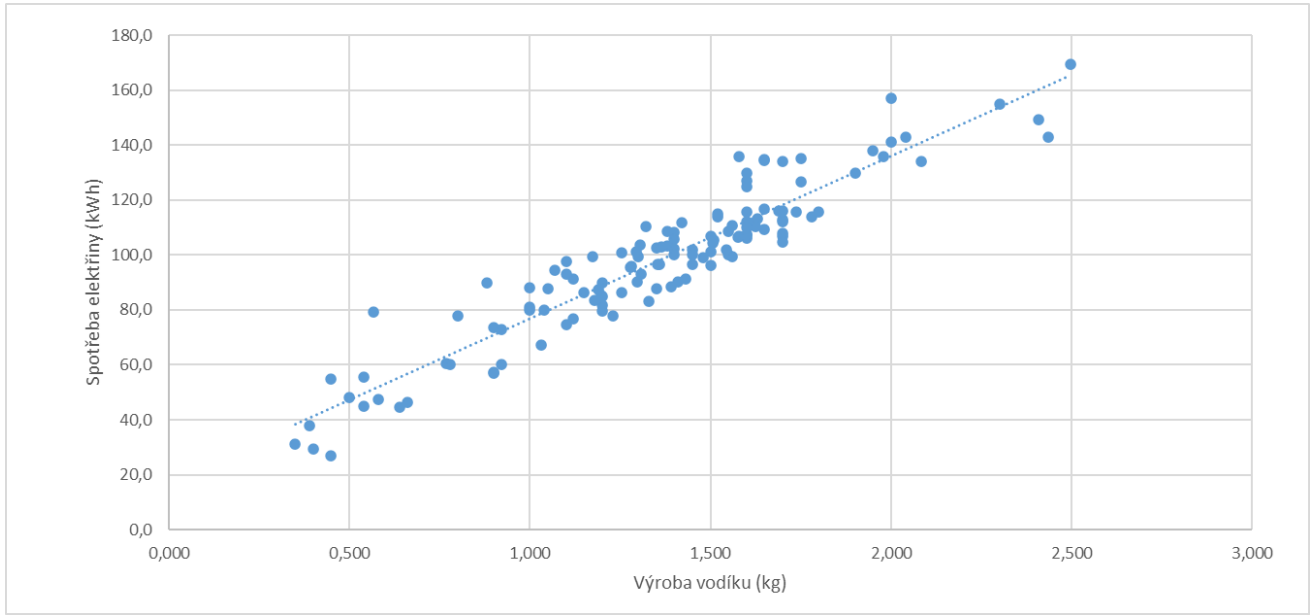


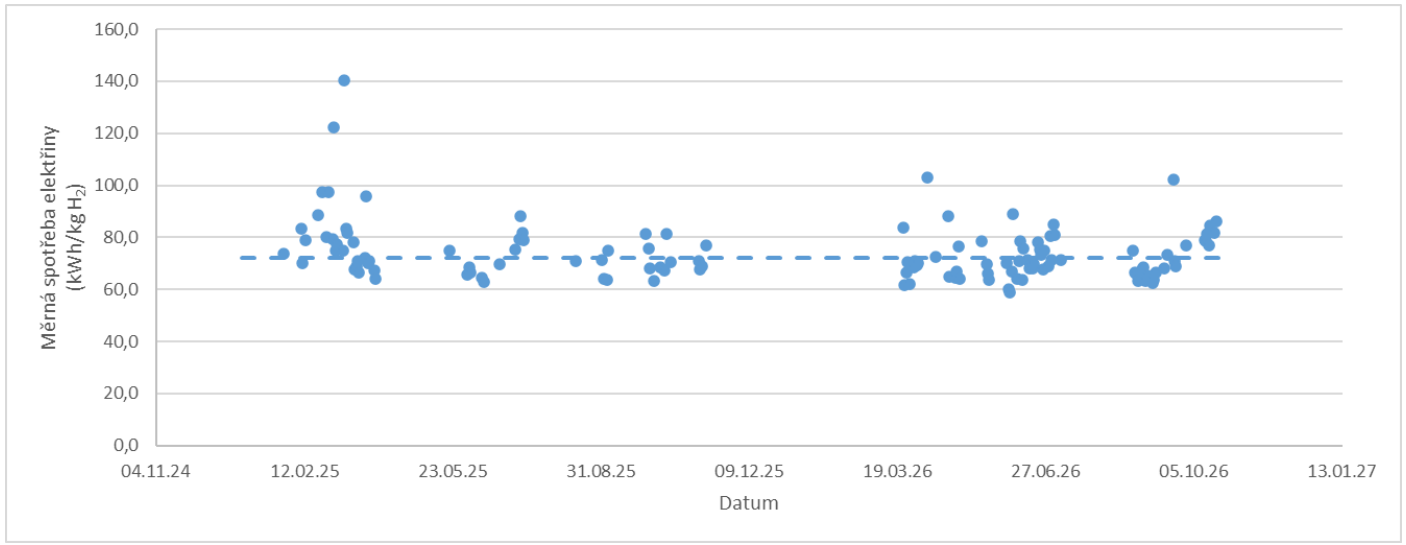






ELEKTROLYZÉRY – DLOUHODOBÁ PRODUKCE





- Dlouhodobé sledování v LVT: leden 2025 – říjen 2026, celkem 128 provozních záznamů.
- Celková evidovaná výroba: 174,3 kg H_2 při spotřebě 12,57 MWh elektrické energie.
- Celková měrná spotřeba elektřiny: 72,2 kWh/kg H_2.
- Porovnání provozních záznamů:
  - 73,1 kWh/kg v roce 2025
  - 71,5 kWh/kg v roce 2026.



METALHYDRIDOVÉ ZÁSOBNÍKY

MyH2 2000 – H2Planet

- Typ slitiny: AB_2
- Kapacita: 2 000 Nl H_2 (180 g)
- Plnicí tlak: 5–12 bar, max. 30 bar
- Hmotnost: 14 kg
- Kompaktní, opakovaně plnitelný zásobník využívající reverzibilní absorpci vodíku v metalhydridu



GSH3000 – Hydrogenera

- Typ slitiny: AB_5
- Kapacita: 3 000 Nl H_2 (3 Nm^3)
- Plnicí tlak: 15 bar, výstupní tlak 2–15 bar
- Nominální průtok: 50 l/min (za definovaných tepelných podmínek)
- Hmotnost: 40 kg, integrovaný tepelný výměník

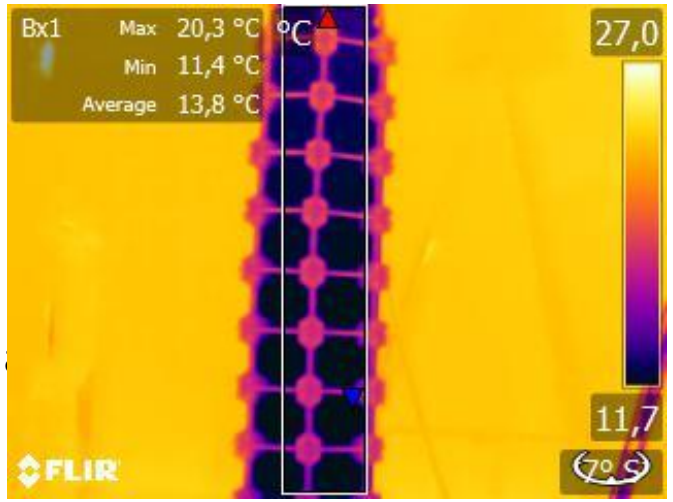


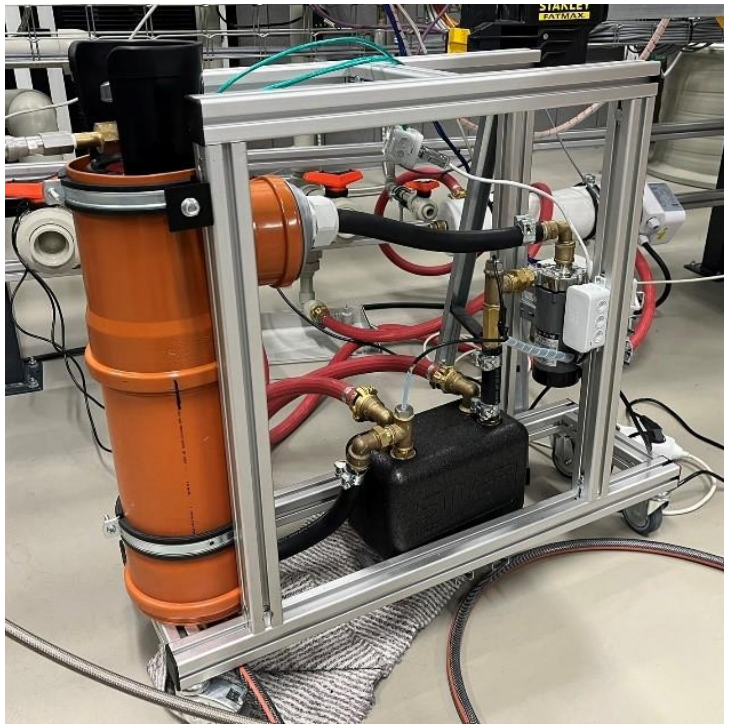
METALHYDRIDY – VLIV TEPELNÉHO ŘÍZENÍ

Diplomová práce Viléma Planky, 2025 | zásobník MyH_2 2000

Co bylo řešeno:

- Návrh a realizace aparatury pro řízené plnění a vyprazdňování metalhydridového zásobníku
- Aktivní řízení teploty vodním okruhem: chlazení při absorpci a ohřev při desorpci
- Měření průtoku a tlaku; sledování teplotního pole zásobníku pomocí 27 termočlánků a termokamery.





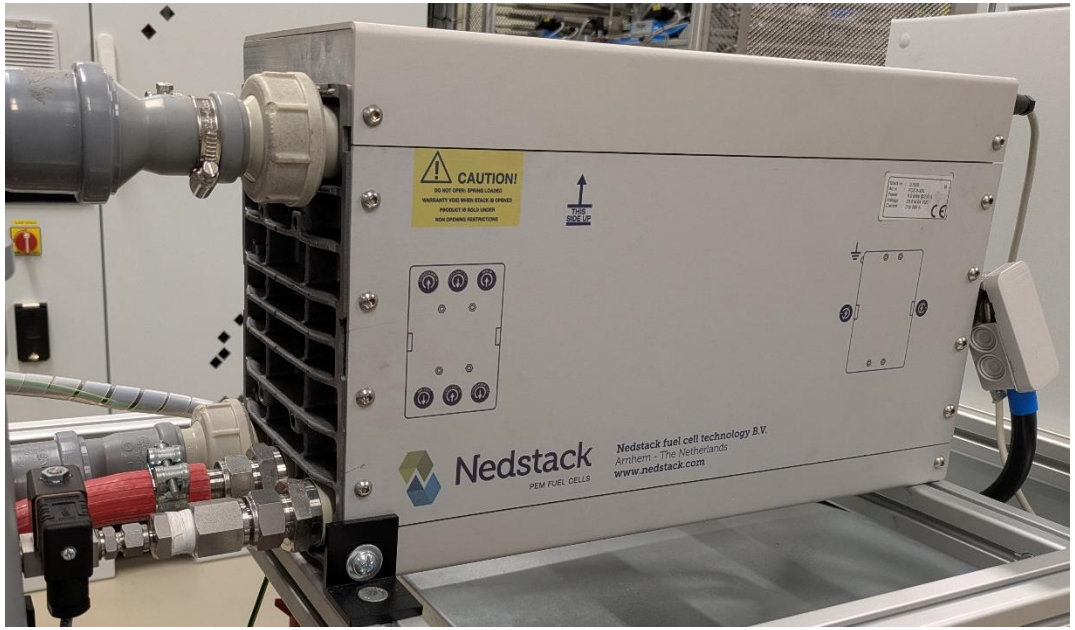
Hlavní výsledky

- Plnění / absorpce – 90 % kapacity
- 16–17 hodin → 1 hodina 57 minut
  Chlazení vodou o teplotě 11 °C zrychlilo plnění více než 8×.
- Výdej H_2 / desorpce – 90 % kapacity
- téměř 30 hodin → 2 hodiny 50 minut
  Ohřev vodou o teplotě 55 °C zrychlil výdej vodíku více než 10×.
- Nižší teplota při absorpci zároveň umožnila uložit větší množství vodíku. Při 11 a 15 °C bylo dosaženo plné kapacity 2 000 Nl, tedy přibližně 180 g H_2.

PALIVOVÉ ČLÁNKY

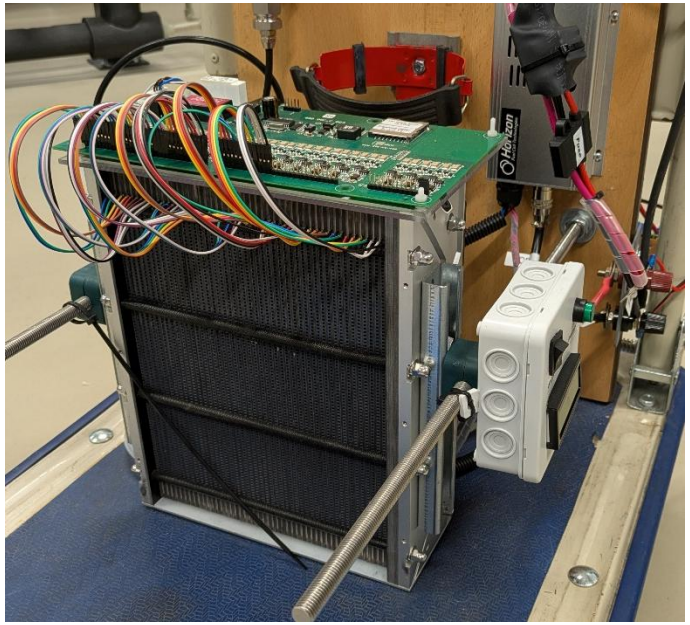
Nedstack FCS 8-XXL

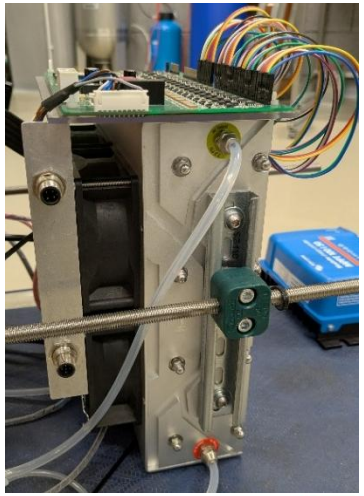
- Výrobce: Nedstack Fuel Cell Technology B.V., Nizozemsko.
- Technologie: uzavřená katoda
- Jmenovitý výkon: 8 kW; proud až 230 A.
- Provozní teplota: 65 °C; kapalinové chlazení.
- Tlak H_2: 0,15–0,30 bar(g).
- Sledování napětí jednotlivých článků (CVM).
- Elektrická účinnost: 44 % při 8 kW.



Horizon H-1000

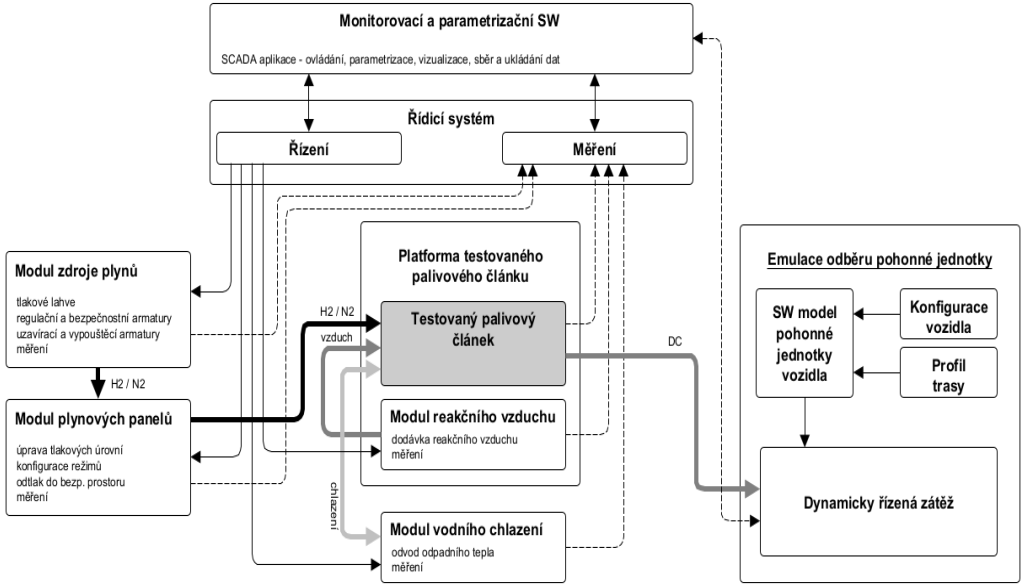
- Výrobce: Horizon Fuel Cell Technologies; dodavatel Horizon Educational.
- Technologie: otevřená katoda
- Jmenovitý výkon: 1 kW; 48 PEM článků.
- Jmenovitý pracovní bod: 28,8 V při 35 A.
- Tlak H_2: 0,55–0,65 bar; čistota ≥ 99,995 %.
- Vzduchové chlazení a samozvlhčování.
- Elektrická účinnost: 40 % při 1 kW.

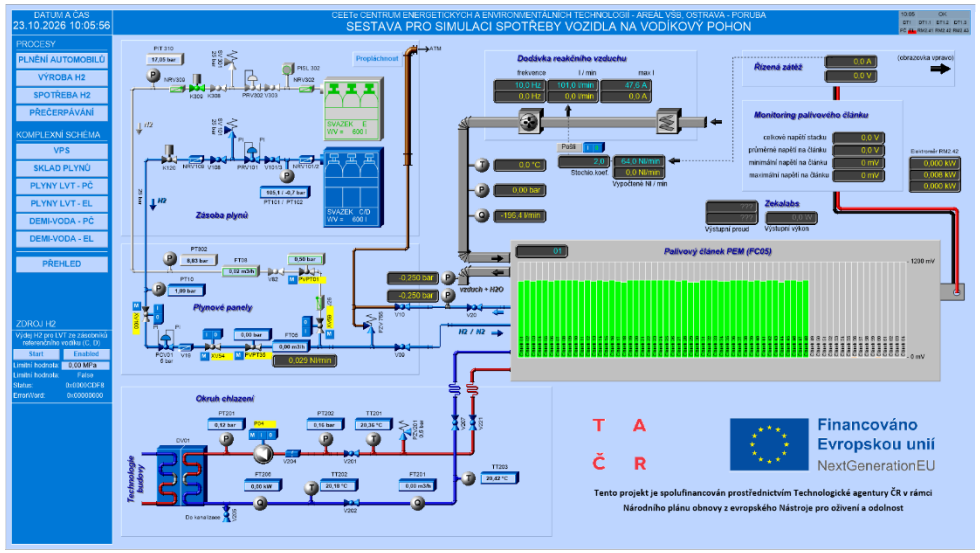


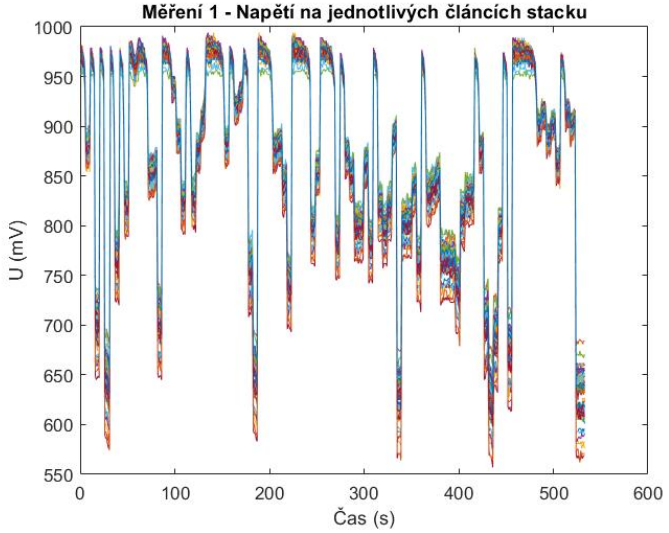


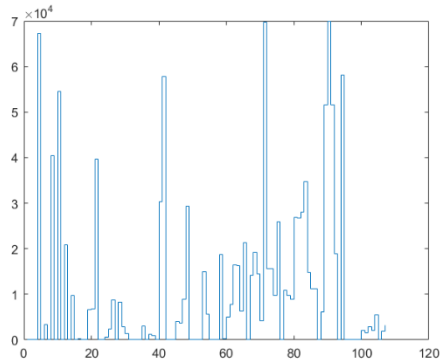
MODULÁRNÍ SESTAVA – SIMULACE SPOTŘEBY VOZIDLA

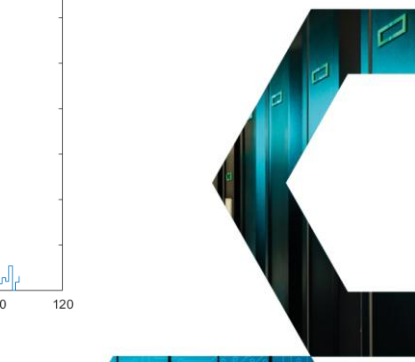
- Referenční vozidlo: Nissan Leaf 1. generace (2017), elektromotor 80 kW, baterie 30 kWh.
- Laboratorní simulace: zatěžování PEM palivového článku Nedstack FCS 8-XXL (8 kW) podle modelovaných i naměřených jízdních profilů.
- Dynamická zátěž: programovatelné DC zátěže EA-EL 9400-150A, při testech škálování požadovaného výkonu na 0–2 kW.
- Sledování odezvy: napětí jednotlivých článků stacku, dodaná elektrická energie a spotřeba H_2 při proměnném zatížení.







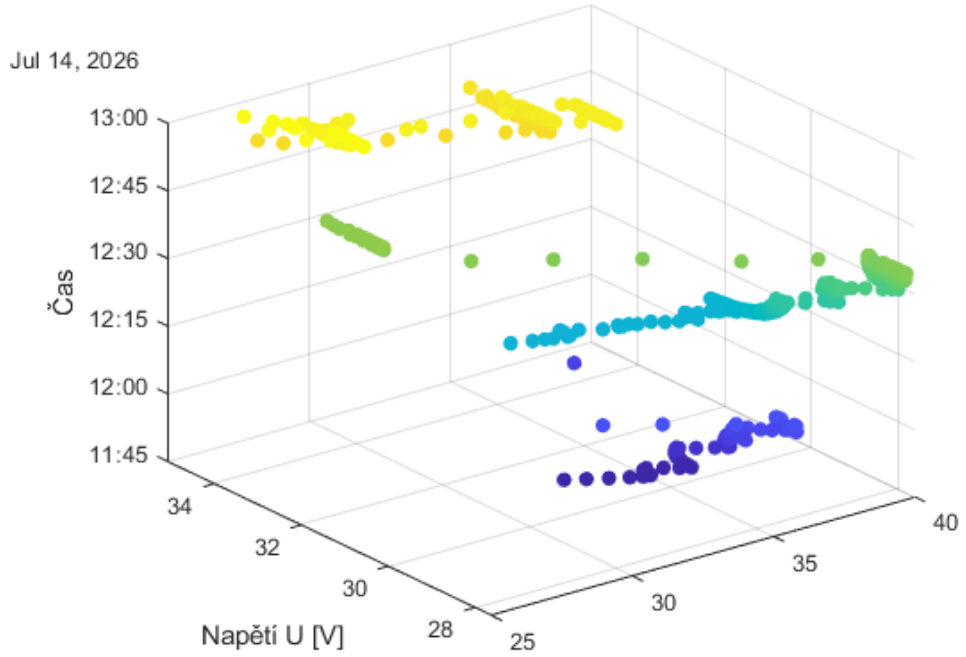


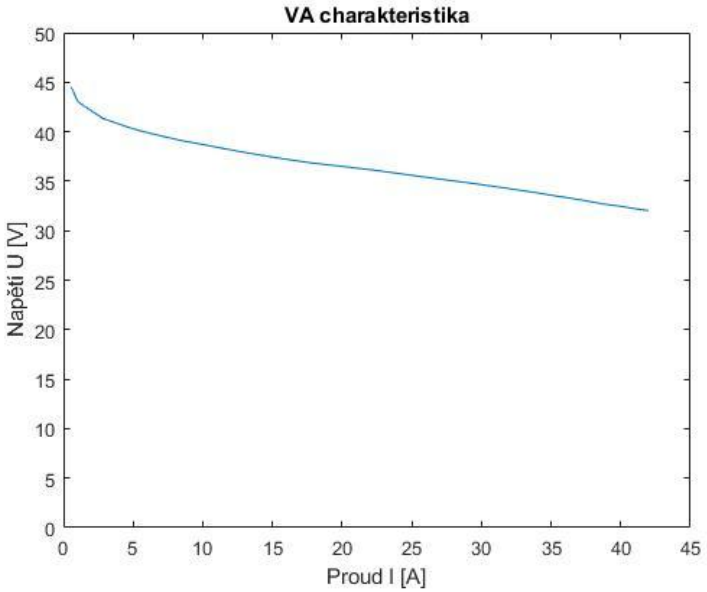


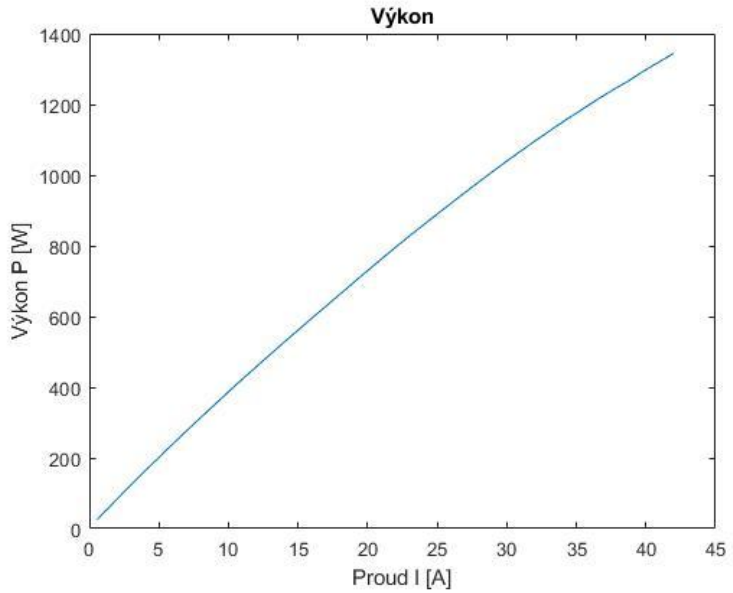


HORIZON H-1000 – VA CHARAKTERISTIKY

- Jmenovitý výkon 1 kW při pracovním bodu 28,8 V / 35 A.
- Ochranné prahy: podpětí 24 V, nadproud 42 A, teplota stacku 65 °C.
- Provozní podmínky: okolní teplota 5–30 °C, vstupní tlak H_2 0,45–0,55 bar.
- Sledování napětí a proudu při změnách zatížení, vyhodnocení charakteristik U(I) a P(I).
- Data pro parametrizaci modelu a porovnávání provozního chování palivového článku.









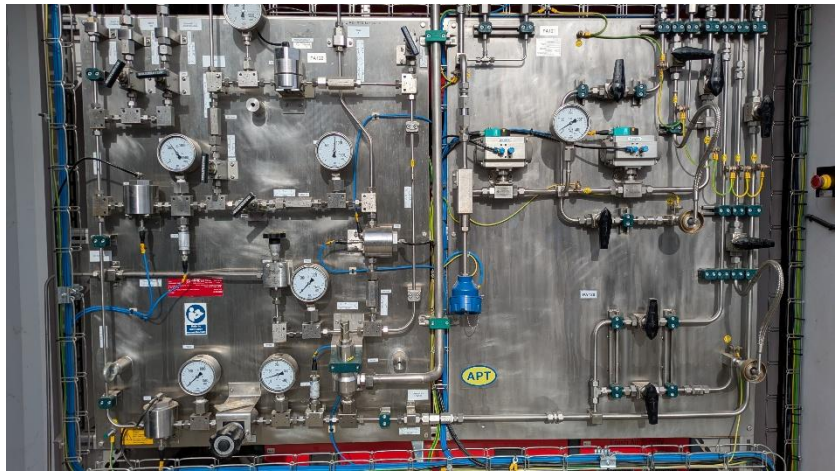
VODÍKOVÁ PLNICÍ STANICE

- Plnění vozidel: osobní vodíková vozidla s nominálním tlakem 700 bar, rozhraní H70, např. Hyundai Nexo, Toyota Mirai.
- Výdejní zařízení Tatsuno Europe.
- Kompresor / booster: Maximator X-Tower:
  - vstupní tlak 25 bar,
  - komprese na 975 bar,
  - maximální průtok 10 kg H_2/h.
- Zásoba vodíku: přibližně 60 kg H_2:
  - 2 × 2 220 l (200 bar),
  - 2 × 600 l (200 bar),
  - 2 × 315 l (900 bar).
- Kapacita plnění: 18 kg H_2/den, tedy 3 náplně po 6 kg.
- Doba plnění 6 kg H_2: 30 minut.
- Zdroj a využití H_2: vodík z laboratorních elektrolyzérů i dodávaných lahvových svazků; propojení s laboratoří vodíkových technologií pro výzkum a nekomerční provoz.
- Provedení stanice: kontejner 6 × 2,4 m, celkový instalovaný elektrický příkon 52,7 kW.









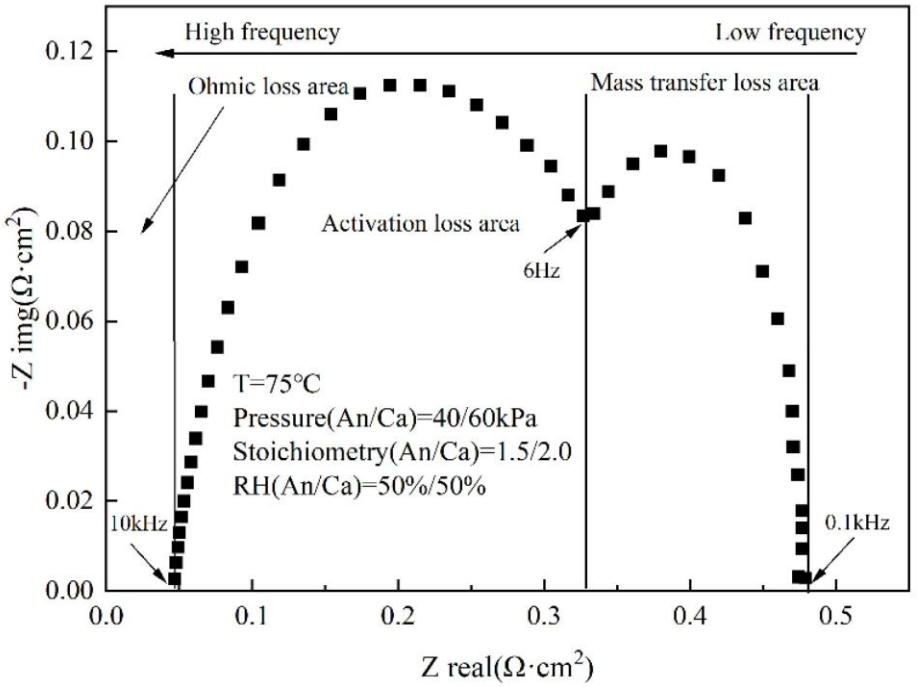
ELEKTROCHEMICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE

EIS – elektrochemická impedanční spektroskopie

- Princip: Měření odezvy na malý střídavý proud nebo napětí při různých frekvencích — výsledkem je impedanční spektrum.
- Analýza ztrát: Pomáhá rozlišit ohmický odpor, kinetiku elektrodových reakcí a omezení transportu látek.
- Diagnostika stavu: U PEM článků pomáhá odhalovat například vysychání membrány nebo zaplavování elektrod vodou.
- Praktický přínos: Optimalizace provozních podmínek, porovnávání konstrukčních řešení a kontrola kvality elektrochemických zařízení.

MegaEIS – Kolibrik.net

- EIS diagnostika palivových článků, elektrolyzérů a baterií
- 0,1 Hz–10 kHz | 0–60 V DC | až 200 A
- EIS během zatěžování i napájení zařízení
- Vícekanálové měření jednotlivých článků – 16 kanálů
- Identifikace ztrát, nehomogenit a degradačních procesů



Ukázka Nyquistova diagramu PEM palivového článku. Zdroj: Zhao a kol., Energies 15 (2022), 386, obr. 2, CC BY 4.0.

Děkuji za pozornost

Ing. Filip Krupa, Ph.D.
filip.krupa@vsb.cz
https://ceet.vsb.cz/cenet/cs/

