Výskum separácie vodíka zo syntéznych plynov

Output: V10 - Optimalizovaný separátor vodíka zo syntézneho plynu s optimalizovanými prevádzkovými parametrami.
Project number: 09I03-03-V04-00647

Financované Európskou úniou NextGenerationEU
PLÁN OBNOVY
MINISTERSTVO ŠKOLSTVA, VÝSKUMU, VÝVOJA A MLÁDEŽE SLOVENSKEJ REPUBLIKY

1. Úvod

Overenie optimalizácie prototypu zariadenia na separáciu vodíka bolo vykonané na základe experimentálnych meraní realizovaných na prietočnom separačnom zásobníku s náplňou kovového hydridu Hydralloy C5. Cieľom overenia bolo posúdiť vplyv jednotlivých konštrukčných a prevádzkových úprav na priebeh absorpcie vodíka, tepelnú stabilitu zariadenia a podmienky jeho prevádzky. Optimalizačný proces vychádzal z experimentálne získaných údajov o tlaku, teplote, prietoku vodíka a chladiaceho média a z následného vyhodnotenia vzájomných závislostí týchto veličín.

Samostatná pozornosť bola venovaná predovšetkým odvodu reakčného tepla vznikajúceho pri absorpcii vodíka, keďže nárast teploty hydridového loža negatívne ovplyvňuje ďalší priebeh absorpcie. Súčasne bol sledovaný vplyv prietoku plynu, tlakových podmienok a geometrie chladiaceho systému.

2. Cieľ overenia optimalizácie

Hlavným cieľom bolo experimentálne overiť, či vykonané optimalizačné opatrenia vedú k zlepšeniu prevádzkových parametrov separátora a k stabilnejšiemu priebehu absorpcie vodíka.

Overenie bolo zamerané najmä na:

- zvýšenie účinnosti odvodu absorpčného tepla,
- obmedzenie nárastu teploty hydridového loža,
- stabilizáciu teplotných podmienok počas absorpcie,
- optimalizáciu prietoku chladiaceho média,
- posúdenie vplyvu tlaku na priebeh absorpcie,
- vyhodnotenie zmeny prietoku vodíka počas plnenia hydridu,
- zníženie tlakových strát v separačnom systéme,
- overenie vhodnosti konštrukcie pre ďalšie experimenty a prípadné zväčšenie zariadenia.

Optimalizácia bola realizovaná ako postupný proces, pri ktorom boli jednotlivé úpravy posudzované na základe nameraných experimentálnych údajov.

3. Východiskový stav prototypu

Prototyp separátora pozostáva zo separačnej nádoby obsahujúcej kovový hydrid Hydralloy C5, systému prívodu a odvodu plynu, chladiaceho okruhu, regulačných prvkov a meracieho systému.

Základnou funkciou separačnej nádoby je zabezpečiť kontakt vstupujúcej plynnej zmesi s kovovým hydridom a umožniť selektívnu absorpciu vodíka.

Východiskové experimenty boli realizované na prietočnom zásobníku MNTZV-60. Pri experimentoch boli sledované najmä:

- tlak v separačnom systéme,
- teplota hydridového loža,
- teplota chladiacej vody na vstupe,
- teplota chladiacej vody na výstupe,
- prietok vodíka,
- celkový objem pretečeného vodíka,
- teplota okolitého prostredia.

Experimenty boli realizované pri rôznych tlakových podmienkach s cieľom stanoviť vplyv tlaku na priebeh absorpcie.

Pri absorpcii bolo pozorované, že prietok vodíka vstupujúceho do separačnej nádoby sa v priebehu experimentu mení. Na začiatku procesu je absorpčná schopnosť hydridu najvyššia a vodík je intenzívnejšie viazaný do hydridovej fázy. S rastúcim stupňom nasýtenia hydridu dochádza k postupnému spomaľovaniu absorpcie.

Tento priebeh je možné schematicky rozdeliť na tri fázy:

I. Počiatočná fáza – intenzívna absorpcia

$$\dot{m}_{H_2,abs} \rightarrow \text{max.}$$

II. Prechodná fáza – postupné spomaľovanie

$$\frac{d\dot{m}_{H_2,abs}}{dt} < 0$$

III. Stav blížiaci sa k nasýteniu

$$\dot{m}_{H_2,abs} \rightarrow 0$$

Práve priebeh týchto troch fáz bol použitý ako jeden z ukazovateľov účinnosti optimalizačných zásahov.

4. Identifikácia optimalizačných krokov

Na základe prvotných experimentov boli identifikované hlavné oblasti, v ktorých bolo možné prototyp optimalizovať.

Optimalizačný krok 1 – optimalizácia odvodu tepla

Prvým krokom bolo zlepšenie podmienok odvodu tepla z hydridového loža. Dôvodom bola skutočnosť, že absorpcia vodíka je exotermický proces a lokálny nárast teploty môže obmedzovať ďalšiu absorpciu.

Pozornosť bola preto venovaná:

- prietoku chladiacej vody,
- teplotnému rozdielu medzi vstupnou a výstupnou chladiacou vodou,

Optimalizačný krok 2 – optimalizácia prietoku chladiaceho média

Ďalším krokom bolo stanovenie vhodného prietoku chladiacej vody.

Pri príliš nízkom prietoku dochádza k nedostatočnému odvodu tepla:

$$\dot{Q}_{cool} \downarrow \;\Rightarrow\; T_{MH} \uparrow$$

Naopak, zvýšenie prietoku zvyšuje schopnosť chladiaceho systému odvádzať teplo:

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{out} - T_{in})$$

kde:

- $\dot{m}_w$ je hmotnostný prietok chladiacej vody,
- $c_{p,w}$ je merná tepelná kapacita vody,
- T_{in} je teplota vody na vstupe,
- T_{out} je teplota vody na výstupe.

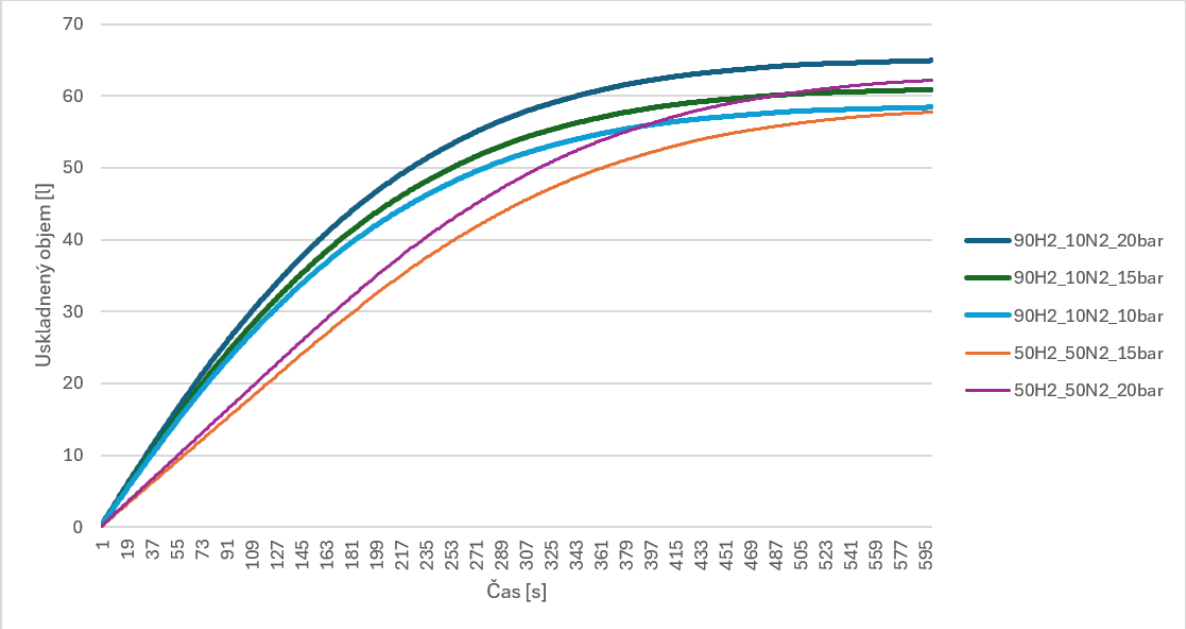
Na základe experimentálnych údajov bol sledovaný kompromis medzi chladiacou schopnosťou a požiadavkami na čerpadlo a chladiaci systém.

Optimalizačný krok 3 - optimalizácia tlakových podmienok

Ďalším sledovaným parametrom bol tlak vstupnej plynnej zmesi.

Zvýšenie parciálneho tlaku vodíka môže podporovať absorpciu do kovového hydridu. Skutočný priebeh procesu je však zároveň ovplyvnený teplotou hydridu, aktuálnym stavom nabitia a kinetikou absorpcie.

Pre experimentálne overenie boli sledované procesy pri tlakoch v rozsahu 10 – 30 bar.



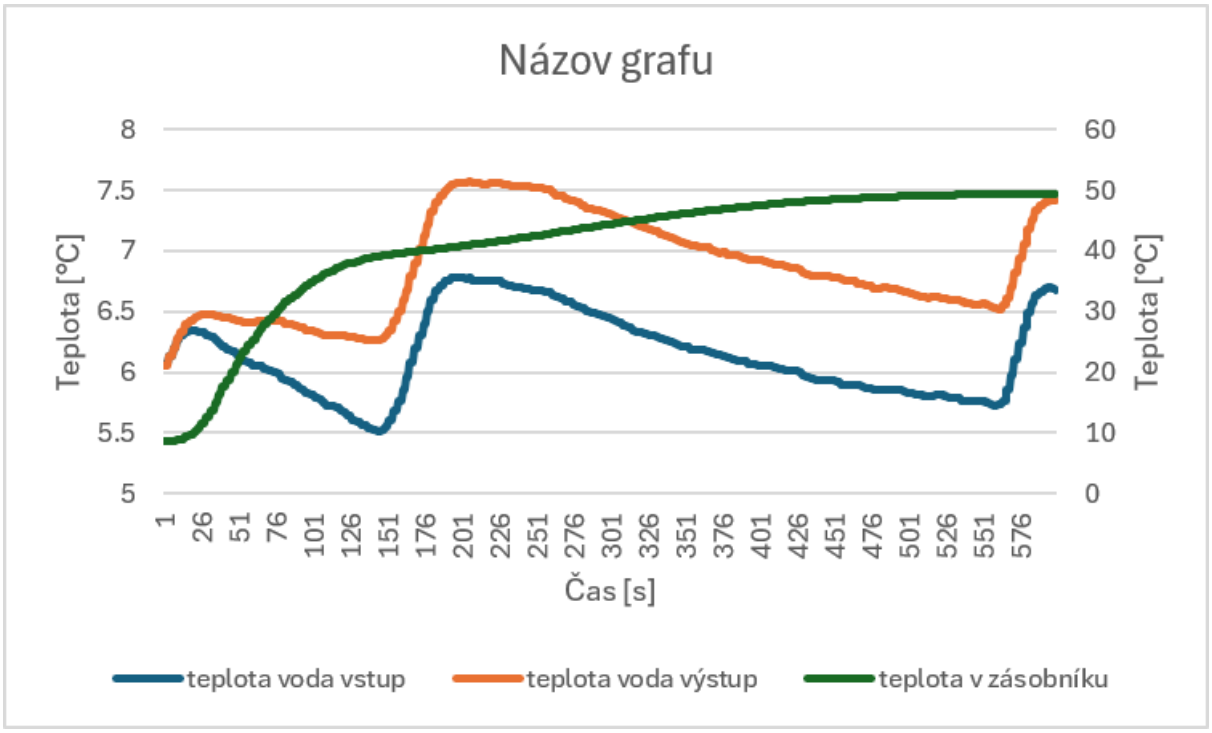
Obrázok 1 Priebeh množstva uskladneného vodíka v MH separátore s časom pri rôznych tlakoch a koncentráciách

5. Postup optimalizácie

Optimalizácia prototypu zariadenia na separáciu vodíka prebiehala postupne na základe poznatkov získaných z prvých experimentálnych skúšok a vyhodnotenia správania jednotlivých častí systému.

Ako prvý optimalizačný krok bola vykonaná úprava rozvodov vodíka. Na základe vyhodnotenia pôvodného zapojenia boli upravené dĺžky rozvodných potrubí medzi jednotlivými funkčnými časťami zariadenia. Cieľom bolo minimalizovať zbytočne dlhé úseky potrubia, počet miestnych odporov a tým aj celkové tlakové straty v systéme. Skrátením rozvodov sa zároveň zmenšil vnútorný objem potrubného systému, čo malo pozitívny vplyv na dynamiku zmeny tlaku a prietoku pri jednotlivých prevádzkových stavoch.

Ďalším krokom bola úprava prietoku chladiacej kvapaliny. Počas absorpcie vodíka v metalhydridovom lôžku vzniká teplo, ktoré je potrebné kontinuálne odvádzať, aby nedochádzalo k nadmernému nárastu teploty separačného média. Zmena prietoku chladiacej kvapaliny bola preto vykonaná s cieľom dosiahnuť účinnejší a stabilnejší odvod tepla zo separačnej nádoby. Pri optimalizácii bol sledovaný najmä vzťah medzi prietokom chladiacej kvapaliny, teplotou na vstupe a výstupe chladiaceho okruhu a teplotou hydridového loža. Úpravou prietoku bolo možné lepšie prispôsobiť chladiaci výkon aktuálnemu tepelnému zaťaženiu zariadenia a obmedziť vplyv nárastu teploty na priebeh absorpcie vodíka.



Obrázok 2 Priebeh zmeny teploty v zásobníku a zmeny teploty chladiacej vody na vstupe a výstupe

Významná časť optimalizácie bola následne zameraná na úpravu riadiaceho softvéru. Pôvodné riadenie bolo rozšírené o kontrolné podmienky, ktoré umožňujú vyhodnocovať aktuálny stav zariadenia pred vykonaním jednotlivých riadiacich krokov. Osobitná pozornosť bola venovaná sekvencii otvárania a zatvárania ventilov, aby nemohlo dôjsť k vytvoreniu nevhodnej kombinácie otvorených a zatvorených ventilov, ktorá by mohla viesť k nežiaducemu nárastu alebo poklesu tlaku v určitej časti systému. Riadiaci program bol preto upravený tak, aby jednotlivé operácie vykonával v definovanom poradí a pred ich vykonaním kontroloval splnenie požadovaných podmienok.

S úpravou softvéru súviselo aj rozšírenie bezpečnostných funkcií riadiaceho systému. Do programu boli zahrnuté reakcie na neštandardné a potenciálne nebezpečné prevádzkové stavy. Jedným z posudzovaných stavov je napríklad nesprávny postup otvorenia ventilov, pri ktorom môže dôjsť k nežiaducemu spojeniu tlakových vetiev alebo k náhlej zmene tlaku. Riadiaci systém preto umožňuje v prípade identifikácie neplatnej sekvencie zabrániť pokračovaniu procesu alebo prejsť do bezpečného stavu.

```
bool openValveSafe(byte valve)
{
  // Priklad bezpecnostnej logiky

  if (emergencyState)
  {
    return false;
  }

  // Ventil 1 mozno otvorit iba ak je ventil 2 zatvoreny
  if (valve == relay_1)
  {
    if (digitalRead(relay_2) == HIGH)
    {
      Serial.println("CHYBA: Nedovolena kombinacia ventilov!");
      emergencyStop();
      return false;
    }
  }

  digitalWrite(valve, HIGH);

  return true;
}
```

Obrázok 3 Ukážka bezpečnostného prvku v kóde s popisom

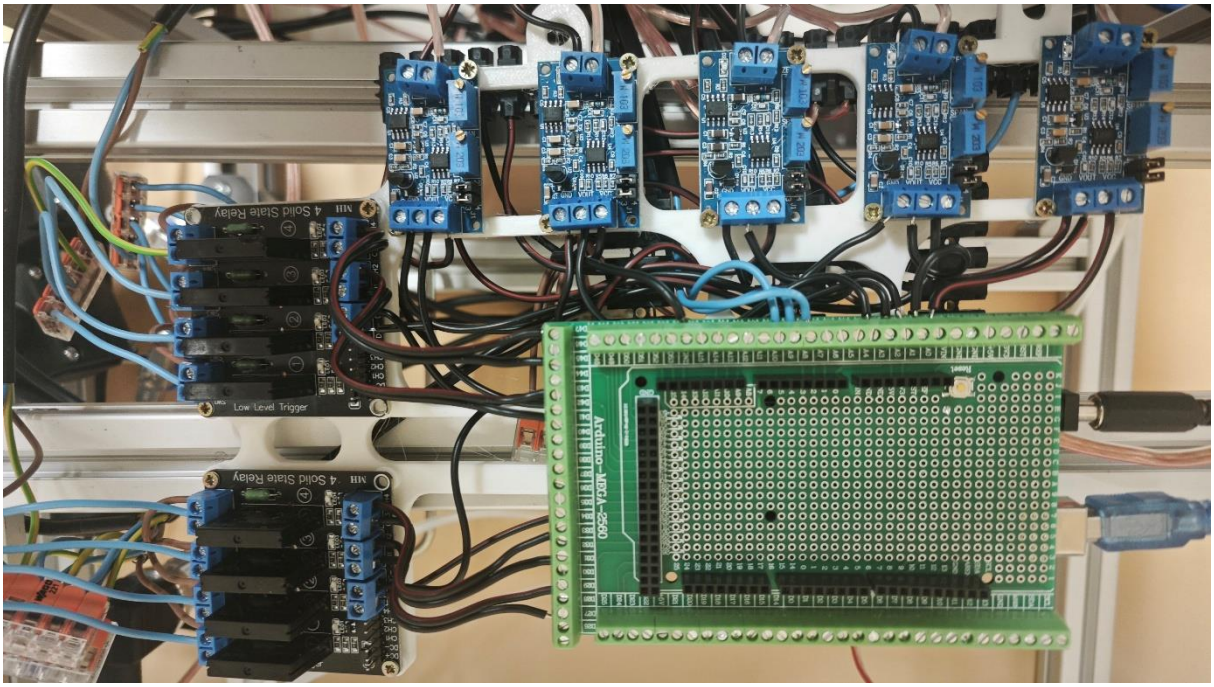
Ďalším bezpečnostným stavom je výpadok elektrického napájania. Pri strate napájania nesmie byť zariadenie ponechané v stave, ktorý by mohol viesť k nekontrolovanému priebehu procesu po obnovení napájania. Riadiaci systém a zapojenie akčných členov boli preto upravené tak, aby pri výpadku napájania došlo k prechodu systému do definovaného bezpečného stavu.

Bezpečnostné opatrenia boli rozšírené aj o detekciu straty tlaku v systéme, ktorá môže indikovať poškodenie potrubia, netesnosť alebo inú poruchu tlakovej časti zariadenia. Náhla alebo neočakávaná zmena tlaku je preto vyhodnocovaná ako poruchový stav. V prípade prekročenia definovaných limitov riadiaci systém vykoná bezpečnostnú sekvenciu, ktorej cieľom je obmedziť ďalší prívod vodíka a zabrániť pokračovaniu experimentu za nevyhovujúcich podmienok.

```
void checkPressureSafety()
{
 if (pressureBar < MIN_SYSTEM_PRESSURE)
 {
  Serial.println("!!! STRATA TLAKU !!!");

  allOutputsOff();

  emergencyState = true;
 }

 if (pressureBar > MAX_SYSTEM_PRESSURE)
 {
  Serial.println("!!! PREKROCENY TLAK !!!");

  allOutputsOff();

  emergencyState = true;
 }
}
```

Obrázok 4 Ukážka bezpečnostného prvku v kóde pre problémy s tlakom

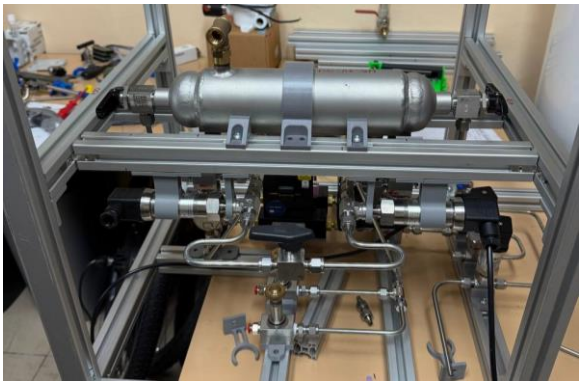
Ďalšou významnou úpravou bola optimalizácia riadiaceho a meracieho systému z hľadiska elektrického zapojenia. Pri pôvodnom usporiadaní boli niektoré snímače a prevodníky pripojené pomocou dlhších káblových trás. Pri analógových signáloch, najmä pri nízkych napäťových úrovniach a signáloch citlivých na elektromagnetické rušenie, môže dlhšia kabeláž zvyšovať riziko interferencií a kolísania meraného signálu. Z tohto dôvodu bolo vykonané skrátenie káblových trás medzi snímačmi, prevodníkmi a riadiacou jednotkou a zároveň bola upravená organizácia kabeláže tak, aby boli signálové vedenia v čo najväčšej miere oddelené od výkonových a spínaných obvodov. Cieľom tejto úpravy bolo zníženie elektromagnetického rušenia a zvýšenie stability a opakovateľnosti nameraných údajov.

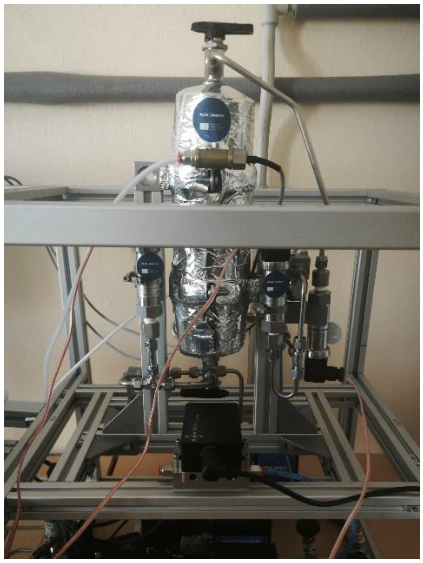


Obrázok 5 Skrátené prepojenie elektronických komponentov s riadiacim systémov Arduino MEGA

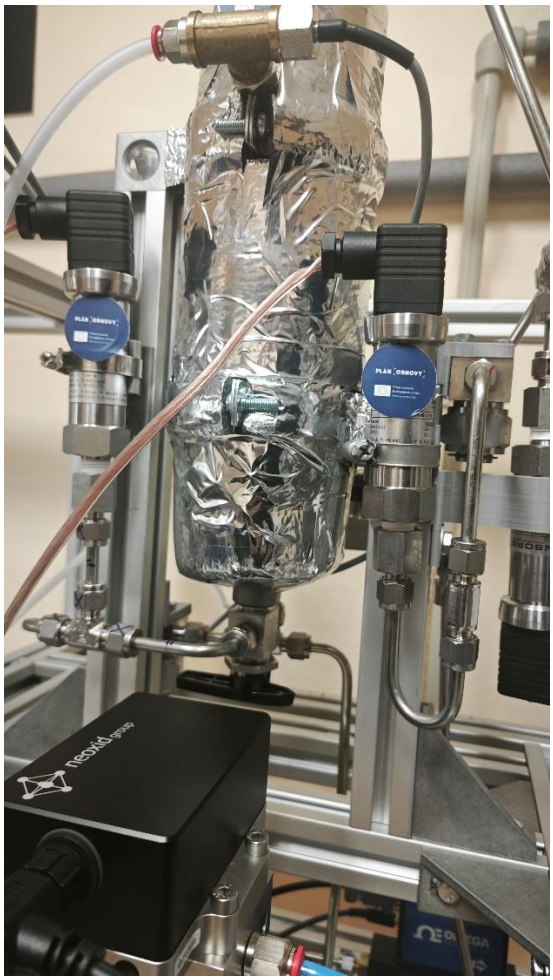
Úprava riadiaceho systému zároveň umožnila lepšie prepojiť meranie, reguláciu a bezpečnostné funkcie do jedného riadiaceho celku. Aktuálne hodnoty tlaku, teploty a prietoku sú využívané nielen na zaznamenávanie experimentálnych údajov, ale aj na priebežné posudzovanie stavu zariadenia. Riadiaci systém tak môže reagovať na prekročenie nastavených limitov a prerušiť proces ešte pred vznikom závažnejšieho poruchového stavu.

Optimalizácia preto prebiehala ako postupný proces pozostávajúci z mechanických, tepelných, elektrických, softvérových a bezpečnostných úprav. Najskôr boli optimalizované potrubné rozvody s cieľom znížiť tlakové straty, následne bol upravený chladiaci systém s ohľadom na tepelnú záťaž pri absorpcii vodíka. Ďalšia etapa bola zameraná na riadiaci softvér a zavedenie bezpečnostných podmienok pre neštandardné prevádzkové stavy. Súčasne bola optimalizovaná kabeláž meracieho a riadiaceho systému s cieľom obmedziť interferencie a zvýšiť kvalitu získavaných dát.





Obrázok 6 Zmena umiestnenia separačnej jednotky a zmena jej polohy z horizontálneho usporiadania na vertikálne



Obrázok 7 Úprava prívodu chladiacej vody a rozvodov vodíka

6. Zhrnutie výsledkov optimalizácie

Optimalizácia prototypu zariadenia na separáciu vodíka bola realizovaná postupne na základe výsledkov prvotných experimentov a identifikovaných nedostatkov jednotlivých častí zariadenia. Úpravy boli zamerané nielen na samotný proces separácie, ale aj na hydraulické, tepelné, meracie, riadiace a bezpečnostné vlastnosti prototypu.

V prvej fáze boli upravené rozvody vodíka, predovšetkým skrátením potrubných trás a optimalizáciou ich vedenia. Tým sa znížil počet zbytočných tlakových strát a zároveň sa zmenšil vnútorný objem rozvodov.

Následne bol optimalizovaný prietok chladiacej kvapaliny, pričom cieľom bolo zlepšiť odvod tepla vznikajúceho pri absorpcii vodíka do metalhydridu. Úprava chladiaceho režimu umožnila lepšie kontrolovať teplotu hydridového lôžka a obmedziť jej nežiaduci nárast počas intenzívnej fázy absorpcie.

V druhej fáze optimalizácie bola vykonaná úprava riadiaceho systému a softvéru. Riadiaci program bol rozšírený o kontrolu jednotlivých prevádzkových stavov, kontrolu sekvencie otvárania ventilov a reakcie na neštandardné hodnoty meraných veličín. Do systému boli doplnené bezpečnostné funkcie reagujúce napríklad na nesprávnu sekvenciu ventilov, prekročenie povoleného tlaku alebo teploty, nedostatočný prietok chladiaceho média a neočakávanú stratu tlaku v systéme.

Súčasťou optimalizácie bola aj ochrana proti výpadku elektrického napájania a ďalším nepredvídateľným prevádzkovým stavom. Riadiaci systém bol navrhnutý tak, aby po obnovení napájania nedošlo k nekontrolovanému pokračovaniu experimentu bez opätovného overenia základných prevádzkových podmienok.

Optimalizáciou prešiel aj merací a elektrický systém. Skrátením kabeláže medzi snímačmi, prevodníkmi a riadiacou jednotkou a vhodnejším usporiadaním signálových vedení sa znížil potenciál elektromagnetického rušenia. Úprava prispela k stabilnejšiemu snímaniu meraných veličín a k zvýšeniu kvality experimentálnych dát, ktoré sú následne využívané na vyhodnotenie separačného procesu.

7. Záver

Na základe vykonaných úprav možno konštatovať, že optimalizácia významne rozšírila experimentálne možnosti prototypu a zlepšila podmienky jeho prevádzky. Úprava potrubných rozvodov prispela k obmedzeniu tlakových strát, optimalizácia chladiaceho okruhu zlepšila podmienky odvádzania reakčného tepla a úprava riadiaceho systému zvýšila kontrolu nad jednotlivými fázami experimentu.

Zariadenie už neslúži iba na vykonanie experimentu a záznam nameraných údajov, ale umožňuje priebežne vyhodnocovať stav systému a reagovať na vznik neštandardných prevádzkových podmienok.

Optimalizovaný prototyp tak vytvára vhodnejšie podmienky na experimentálne stanovenie vplyvu tlaku, prietoku, teploty a stupňa naplnenia kovového hydridu na priebeh absorpcie vodíka. Získané údaje je možné ďalej využívať na stanovenie kinetických parametrov procesu, vyhodnotenie tepelného správania hydridového loža a validáciu numerických modelov.

Výsledkom optimalizácie je funkčný a experimentálne využiteľný prototyp separačného zariadenia, ktorý poskytuje stabilnejšie prevádzkové podmienky, kvalitnejšie merané údaje a vyššiu úroveň prevádzkovej bezpečnosti.

Financované Európskou úniou NextGenerationEU
PLÁN OBNOVY
MINISTERSTVO ŠKOLSTVA, VÝSKUMU, VÝVOJA A MLÁDEŽE SLOVENSKEJ REPUBLIKY