



(12)

BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2012 00685**

(22) Data de depozit: **26/09/2012**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **30/12/2019** BOPI nr. **12/2019**

(41) Data publicării cererii:
30/04/2014 BOPI nr. **4/2014**

(73) Titular:
• **INSTITUTUL NAȚIONAL DE
CERCETARE-DEZVOLTARE PENTRU
TEHNOLOGII CRIOGENICE ȘI IZOTOPICE**
- **ICSI RÂMNICU VÂLCEA, STR.UZINEI**
NR.4, OP RÂURENI, CP.7,
RÂMNICU VÂLCEA, VL, RO

(72) Inventatori:
• **VARLAM MIHAI, STR. V.OLĂNESCU**
NR. 14, BL.C10, SC.B, ET.1, AP.13,
RÂMNICU VÂLCEA, VL, RO;
• **CULCER MIHAIL,**
STR. GRIGORE PROCOPIU NR. 4, BL. 18,
SC. D, ET. 2, AP. 5, RÂMNICU-VÂLCEA, VL,
RO;

• **RĂCEANU MIRCEA, STR.SUB COASTĂ**
NR.2, BĂILE OLĂNEȘTI, VL, RO;
• **ILIESCU MARIANA, ALEEA COCORILOR**
NR. 2, BL. 21, SC. B, ET. 4, AP. 17,
RÂMNICU-VÂLCEA, VL, RO;
• **ENACHE ADRIAN,**
STR. MR. V. POPESCU NR. 6, BL. P4,
SC. A, ET. 1, AP. 6, RÂMNICU-VÂLCEA, VL,
RO;
• **ȘTEFĂNESCU IOAN,**
BD.NICOLAE BĂLCESCU NR.4,
RÂMNICU VÂLCEA, VL, RO;
• **STANCIU VASILE,**
STR.CALEA LUI TRAIAN NR.135, BL.N2,
SC.A, ET.3, AP.9, RÂMNICU VÂLCEA, VL,
RO

(56) Documente din stadiul tehnicii:
RO 126812 A0; US 2006/0096713 A1

(54) **STAȚIE ENERGETICĂ DE MICĂ PUTERE ȘI PROCEDEU
DE OPTIMIZARE ȘI ALIMENTARE A CONSUMULUI
DE HIDROGEN ȘI AER**



1 Invenția se referă la o stație energetică de mică putere și la un procedeu de optimi-
zare și alimentare a consumului de hidrogen și aer pentru stația energetică de mică putere.

3 Stația este realizată cu pile de combustibil de tip PEM (PEM - Proton Exchange
Membrane, membrană schimbătoare de protoni) și generează o putere electrică de până la
5 maxim 5 kW.

7 Procedeul este utilizat pentru adaptarea puterii generate de stație la necesitățile
consumatorului, în condiții de optimizare a consumurilor.

9 Pilele de combustibil sunt dispozitive electrochimice capabile să convertească în mod
direct energia chimică eliberată în urma reacției dintre un combustibil și un oxidant în energie
electrică, și sunt de mai multe tipuri, în funcție de configurație și de combustibilul utilizat.

11 Răspândirea acestora pe scara din ce în ce mai largă se datorează eficienței ridicate,
versatilității și impactului redus (sau chiar nul, în cazul pilelor alimentate cu hidrogen) asupra
13 mediului.

15 Pilele de combustibil de tip PEM au anodul și catodul realizați din țesătură sau hârtie
din fibră de carbon impregnată cu un catalizator metalic din grupa platinei. Electrozii sunt
separați de un electrolit solid sub formă de membrană realizată dintr-un polimer sulfonat
17 având conductibilitate protonică, dar nu și electronică, permițând transportul ionilor de hidro-
gen (protoni) de la anod la catod și determinând stabilirea în circuitul exterior a unui curent
19 electric circulând de la anod la catod.

21 Alimentarea pilelor de combustibil de tip PEM se face cu hidrogen la anod și oxigen
sau un amestec conținând oxigen (de exemplu aer) la catod.

23 Conductivitatea protonică a membranei este favorizată de prezența moleculelor de
apă, o membrană insuficient hidratată conducând la reducerea semnificativă a puterii gene-
rate de pila de combustibil. De asemenea, funcționarea cu membrană uscată reduce durata
25 de viață a acesteia. Din această cauză, este important ca în interiorul fiecărei pile de com-
bustibil să fie menținută o cantitate suficientă de umiditate, condiție satisfăcută prin utilizarea
27 de gaze de alimentare umidificate.

29 Pe partea catodică a celulei de combustibil se produce apa în urma reacției dintre
ionii de hidrogen (protoni) furnizați la anod, care au trecut prin electrolitul solid (membrana),
și oxigenul furnizat la catod. Acumularea acesteia este posibilă în anumite condiții și are
31 drept urmare inundarea electrodului, cu reducerea consecutivă a disponibilului de oxidant,
deci și a puterii furnizate.

33 Reacția electrochimică catalizată între fluxul de combustibil (hidrogen) furnizat la
anod și cel de oxidant (oxigen sau aer) furnizat la catod este caracterizată de o valoare defi-
35 nită și limitată a diferenței de potențial maxime între cei doi electrozi și produce atât energie
electrică, cât și căldură.

37 Pentru creșterea tensiunii furnizate se utilizează conectarea în serie a mai multor pile
de combustibil într-un ansamblu de pile de combustibil (numit în continuare APC). Această
39 conectare se realizează fizic prin alăturarea sub formă de sandwich a pilelor, ceea ce poate
conduce la supraîncălzirea acestora pe seama căldurii de reacție, mergând până la distru-
41 gerea ansamblului membrană-electrod.

43 Modul de operare al unui ansamblu de pile de combustibil de tip PEM trebuie să
răspundă cerințelor legate de:

- 45 - alimentarea în vederea asigurării stoichiometriei reacției și a preîntâmpinării
deficitului de reactanți;
- 47 - asigurarea nivelului optim de umidificare a reactanților;
- 47 - managementul termic, care trebuie să mențină ansamblul de pile de combustibil la
temperatura optimă de funcționare.

Din punct de vedere al alimentării cu hidrogen la anod, APC de tip PEM poate fi operat în trei moduri:	1
- cu ieșirea anodică deschisă, caz în care alimentarea este continuă și controlată prin debit. Fluxul de hidrogen parcurge continuu circuitul anodic al ansamblului, debitul fiind determinat de valoarea curentului generat și trebuind să fie dimensionat astfel încât să depășească în orice moment stoichiometria. Dacă debitul de hidrogen este insuficient (sub-stoichiometric), APC va absorbi aer pe la ieșirea anodică, ceea ce poate produce oxidarea și deteriorarea ireversibilă a catalizatorului. În anumite situații, în care în circuitul anodic se produce o acumulare de apă pe seama difuziei retrograde a apei generate la catod, devine necesară mărirea semnificativă a debitului de hidrogen, pentru evacuarea acesteia;	3
- cu ieșirea anodică închisă, caz în care alimentarea este intermitentă și controlată prin presiune. La intrare se menține o presiune constantă, ieșirea circuitului anodic fiind închisă prin intermediul unei valve, care este comandată să se deschidă periodic, în vederea purjării anodului. Frecvența și factorul de umplere al semnalului de comandă sunt determinate de valoarea curentului generat;	5
- cu recirculare anodică, ceea ce presupune întoarcerea la intrare a excesului de reactant (hidrogen) neutilizat de la ieșirea anodică. Acest mod de operare nu se utilizează decât în cazul în care alimentarea se face cu gaz pur.	7
Modurile de operare menționate pentru alimentarea cu gaz la anod se pot utiliza și la catod, cu mențiunea suplimentară că alimentarea cu ieșirea catodică închisă se utilizează numai dacă pila lucrează cu oxigen pur drept agent oxidant.	9
Există în literatură diferite scheme de monitorizare, comandă și control al ansamblurilor de pile de combustibil de tip PEM care să asigure cât mai fidel urmărirea cerințelor sarcinii [Claire H. Woo, J. B. Benziger, <i>PEM fuel cell current regulation by fuel feed control</i> - în Chemical Engineering Science 62 (2007) 957 - 968, și US 2005/0136296 A1 , <i>Controlling a Fuel cell system</i>]. Acestea prezintă însă aplicabilitate limitată în aplicații de serie, în care problema optimizării consumului de hidrogen are o mare importanță.	11
Sunt prezentate, de asemenea, diverse metode și sisteme concepute pentru realizarea de funcționalități specifice prin utilizarea pilelor de combustibil de tip PEM, cum este cogenerarea de energie electrică și termică (CHP - Combined Heat and Power): RO 126812 A0 , <i>“Sistem de cogenerare de 5 kW pe baza de celule cu combustibil”</i> și US 2004/0096713 A1 , <i>“Method and apparatus for controlling a combined heat and power fuel cell system”</i> . Aceste metode și sisteme de producere combinată de energie electrică și termică bazate pe ansambluri de pile de combustibil (APC) de tip PEM sunt abordate din punct de vedere al structurii constructive și al metodelor de operare asociate, în vederea armonizării cantității de energie electrică și termică generată cu cerințele de consum pe sarcină. Aspectele legate de optimizarea, constructivă și/sau a consumului de combustibil, în vederea realizării scopului propus, nu sunt evidențiate.	13
Problema tehnică pe care o rezolvă invenția se referă la optimizarea funcționării din punct de vedere al consumurilor și reglării a unei stații energetice de mică putere, în funcție de regimul sarcinii: static sau dinamic.	15
Această problemă tehnică se rezolvă cu o stație energetică de mică putere, realizată cu pile de combustibil de tip PEM, compusă din:	17
- un ansamblu (100) de pile de combustibil de tip PEM de mică putere;	19
- un sistem de gestiune a temperaturii de funcționare a ansamblului (100) de pile de combustibil de tip PEM;	21
- un sistem de gestiune optimizată a umidificării reactanților;	23
- un sistem de gestiune optimizată a alimentării cu hidrogen și aer în corelație cu sarcina;	25

1 - un sistem de monitorizare, comandă și control al funcționării stației energetice de
mică putere, și la care, conform invenției, ansamblul de pile de combustibil este realizat
3 dintr-o succesiune de pile de combustibil de tip PEM conectate în serie, intercalate cu plăci
de răcire, cuprinse între două plăci colectoare, anod și catod, și două plăci de capăt, pentru
5 a produce energie electrică utilizând hidrogen și aer.

Sistemul de gestiune a temperaturii de funcționare a ansamblului de pile de combustibil asigură menținerea temperaturii de funcționare a ansamblului de pile de combustibil la o valoare inferioară temperaturii limită de 90°C, prin utilizarea de plăci de răcire realizate din grafit de înaltă densitate, prin canalizația cărora circulă apa deionizată.

Plăcile de răcire ale ansamblului de pile de combustibil se intercalează după fiecare a doua pilă de combustibil, dispunere care asigură temperatura de funcționare necesară ansamblului de pile de combustibil pentru puteri de până la 5 kW.

Sistemul de gestiune optimizată a umidificării reactanților realizează reducerea consumului de apă deionizată prin colectarea apei deionizate produse la catod și a celei obținute prin difuzie retrogradă la anod, utilizând condensorii, reintroducând-o în circuitul de umidificare a reactanților.

Sistemul de monitorizare, comandă și control al funcționării sale, realizat pe structura unui controler programabil de automatizare, include un regulator fuzzy pentru comanda modificării debitului de combustibil în funcție de regimul sarcinii, consumatorii stației.

Regulatorul fuzzy utilizează un algoritm de reglare a debitului de hidrogen bazat pe patru variabile de intrare, debit și presiune hidrogen, curent și tensiune pe sarcină, o bază cu 185 de reguli și două variabile de ieșire, și anume: durata de purjare a hidrogenului și intervalul de timp dintre două purjări succesive, pentru a genera un semnal digital modulat în durată a impulsului, semnal PWM, utilizat pentru comanda reglării debitului de hidrogen în funcție de necesarul de putere pe sarcină, consumatorii stației.

Procedeul de optimizare și alimentare a consumului de hidrogen și aer pentru stația energetică de mică putere, revendicată mai sus, conform invenției, are următoarea succesiune de operații:

29 - se selectează secvența de operare corespunzătoare regimului dinamic sau static de funcționare pentru adaptarea puterii furnizate de ansamblul de pile de combustibil la necesarul de putere al consumatorilor, pe baza monitorizării cererii de energie pe sarcină,

31 - se realizează alimentarea ansamblului de pile de combustibil cu hidrogen în mod discontinuu pe perioadele când sarcina funcționează în regim static;

33 - se realizează alimentarea ansamblului de pile de combustibil cu hidrogen în mod continuu pe intervalele de timp în care sarcina funcționează în regim dinamic;

35 - se comandă alimentarea ansamblului de pile de combustibil în modul discontinuu de alimentare, cu un semnal PWM generat de către regulatorul fuzzy.

37 Avantajele invenției sunt evidențiate prin faptul că sarcina funcționează în regim static în cea mai mare parte a timpului, variațiile bruște ale puterii absorbite producându-se pe durate scurte de timp, cel mai frecvent la pornire-oprire, precum și la intrarea-ieșirea de consumatori în/din sistem.

41 Alimentarea discontinuă este comandată de un semnal periodic de formă dreptunghiulară cu durata impulsului reglabilă - semnal modulat PWM (Pulse Width Modulation), al cărui factor de umplere determină valoarea debitului de hidrogen la intrarea în pilă. Modalitatea de comandă cu semnal PWM permite reglarea fină a debitului, ceea ce oferă posibilitatea de a opera alimentarea APC cu stoichiometrie redusă, conducând la utilizarea celei mai mici cantități de hidrogen pentru obținerea unei anumite puteri la ieșire.

Această metodă de reglare nu se comportă bine la semnale de intrare cu viteză de variație mare, așa cum este cazul la funcționarea sarcinii în regim dinamic. Pentru a depăși acest obstacol, în cazul funcționării sarcinii în regim dinamic s-a adoptat metoda alimentării continue, prin care variațiile de putere pe sarcină sunt satisfăcute prin operarea APC cu stoichiometrie mare, ceea ce conduce însă la consumuri mărite de hidrogen. Chiar dacă această metodă de reglare a puterii furnizate de APC funcționează și în cazul sarcinii operând în regim static, utilizarea ca metodă unică de reglare ar crește nejustificat consumul de hidrogen, ceea ce reprezintă un obstacol destul de mare în aplicații de serie.	1
Desenele explicative de funcționare a stației energetice de mică putere, realizată cu pile de combustibil de tip PEM, sunt următoarele:	9
- fig. 1, stație energetică de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM. Schema bloc;	11
- fig. 2, controler programabil de automatizare de tip CompactRIO. Schema bloc;	13
- fig. 3, schema logică a rutinei R1 - programul principal de monitorizare, comandă și control al funcționării stației energetice de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM;	15
- fig. 4, schema logică a subrutinei R2 de monitorizare, comandă și control al temperaturii și presiunii de operare a ansamblului de pile de combustibil;	17
- fig. 5, schema logică a subrutinei R3 de stabilire și menținere a umidității gazelor de alimentare a ansamblului de pile de combustibil;	19
- fig. 6, schema logică a subrutinei R4 de comandă și control al funcționării în regim static a stației energetice de mică putere;	21
- fig. 7, schema logică a subrutinei R5 de comandă și control al funcționării în regim dinamic a stației energetice de mică putere;	23
- fig. 8, schema logică a subrutinei R6 de comandă și control al procedurii de recuperare a apei din ansamblul de pile de combustibil;	25
- fig. 9, schema logică a subrutinei R7 de oprire controlată a ansamblului de pile de combustibil;	27
- fig. 10, interfața software pentru monitorizarea, comanda și controlul funcționării stației energetice de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM.	29
Stația energetică de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM conform invenției cuprinde un ansamblu 100 de pile de combustibil de tip PEM (APC), subansamblurile de gestionare a parametrilor de operare (debite, presiuni, temperaturi, umidități) ai acestuia, subansamblurile care realizează adaptarea între puterea generată de APC și cea cerută de sarcină, și subansamblul de monitorizare, comandă și control condus cu un calculator PC 300 .	31
APC 100 este realizat dintr-o succesiune de 40 pile de combustibil de tip PEM având suprafața activă a membranei de 250 cm ² , conectate în serie, intercalate cu plăci de răcire, cuprinse între două plăci colectoare - anod și catod, și două plăci de capăt. Puterea maximă a APC este de 5 kW, iar tensiunea generată în domeniul de 20...38 V la un curent maxim de 250 A. Presiunea de lucru la partea anodică și catodică nu trebuie să depășească 2 bar, iar diferența de presiune anod-catod nu trebuie să fie mai mare de 0,3 bar. Temperatura de funcționare este între 65 și 90°C. Alimentarea se face cu hidrogen de puritate 99,999% la anod și cu aer la catod.	33
Temperatura de operare a APC se realizează prin intermediul unui sistem 10 de gestionare a temperaturii de funcționare a APC, care include un schimbător de căldură în al cărui circuit primar se conectează, după necesități, un încălzitor electric sau o buclă de răcire cu apă.	35
	37
	39
	41
	43
	45
	47

Umidificarea gazelor reactante se realizează cu ajutorul a două umidificatoare, unul **21** cu 780 de tuburi de Nafion, având debitul maxim în sistem apă-gaz de 450 LPM la o presiune maximă de 2 bar, pentru hidrogen, și celălalt **41** cu 1660 tuburi, de până la 1000 SLPM la 3 bar, pentru aer.

În funcție de regimul de funcționare al stației energetice, sistemul de baterii **3** este încărcat în curent constant pe durata regimului static, în funcție de starea sa de încărcare, SoC (State of Charge). Încărcarea bateriilor se face cu un convertor DC-DC **4** care primește la intrare tensiune produsă de APC **100**, pe care o convertește la ieșire într-o tensiune pe magistrala DC în domeniul de 48...56 VDC. Tensiunea de ieșire a convertorului DC-DC **4** este convertită în tensiune de curent alternativ 220 V, 50 Hz prin intermediul convertorului DC-AC **2**.

În fig. 1 se prezintă schema bloc a stației energetice de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM.

Generatorul de energie este un ansamblu de pile de combustibil de tip PEM **100** de mică putere (5 kW), alimentat cu hidrogen **20** și aer **40**.

Monitorizarea, comanda, reglarea și controlul parametrilor funcționali ai sistemului energetic se realizează prin intermediul unui controler programabil de automatizare **200**, numit în cele ce urmează CPA, condus cu calculatorul **300**.

Aducerea temperaturii ansamblului de pile de combustibil de tip PEM la valoarea optimă de funcționare, cuprinsă în general între 65 și 80°C, precum și menținerea temperaturii de funcționare a APC de tip PEM sub valoarea limită superioară de 90°C, se realizează prin utilizarea de plăci de răcire intercalate după fiecare a doua pilă de combustibil, prin canalizația cărora circulă agentul termic sub formă de apă deionizată. Reglarea temperaturii ansamblului de pile utilizează drept sursă rece apa deionizată, iar drept sursă caldă un încălzitor electric. Debitul agentului termic este comandat de către un sistem de răcire/încălzire **10**, care realizează gestionarea temperaturii și presiunii de funcționare a APC **100** de tip PEM în funcție de temperatura măsurată de senzorul de temperatură T7 **13** la ieșirea catodică a APC. La încălzire, agentul termic are debit constant, iar reglarea temperaturii sale se face prin intermediul puterii disipate pe încălzitorul electric. La răcire, agentul termic are temperatura constantă, reglarea temperaturii ansamblului de pile realizându-se prin modificarea debitului de agent termic efectuată prin varierea turației pompei de agent de termic **11**.

Ansamblul **100** de pile de combustibil de tip PEM funcționează cu ieșirea anodică închisă, utilizând pentru controlul debitului de alimentare o electrovalvă **30**, comandată de un regulator fuzzy implementat în controlerul programabil de automatizare C1 **200**.

Alimentarea anodului **39** APC se realizează cu hidrogen de puritate 99,999%, îmbuteliat într-un recipient **20** sub presiune, prin intermediul unui ventil **23**, al unui regulator de presiune **24** și al unui sistem de umidificare a reactanților, numit în continuare SUR_APC, care include un umidificator **21**, un condensor **22** care servește condensării vaporilor de apă în exces, o pompă de recirculare **25** și o electrovalvă **26**. Pe circuitul anodic se măsoară temperatura T1 **31** pe umidificatorul **21** și temperatura T2 **32**, presiunea P1 **33**, debitul D1 **35** și umiditatea RH1 **34** a hidrogenului la intrarea în pilă, precum și temperatura T3 **36** și presiunea P2 **37** ale fluidului la ieșirea anodică și nivelul apei L1 **38** în condensorul **22**.

În momentul în care nivelul L1 **38** al apei în condensorul **22** atinge o anumită valoare prescrisă, Lmax, CPA **200** comandă deschiderea electrovalvei **26** și pornirea pompei **25**; când nivelul L1 **38** atinge valoarea Lmin, CPA **200** comandă închiderea electrovalvei **26** și oprirea pompei **25**.

Alimentarea catodului 59 APC se face cu aer atmosferic, prin intermediul unui blower 40 și al unui sistem de umidificare a reactanților SUR_APC identic celui de la anod. Ieșirea de la catodul ansamblului de pile de combustibil de tip PEM se face pe un condensor 42 care servește condensării vaporilor de apă în exces și întoarcerii apei rezultate în umidificatorul 41 . Pe circuitul catodic se măsoară la intrare temperatura T4 51 pe umidificatorul 41 și temperatura T5 52 , presiunea P3 53 , debitul D2 55 și umiditatea RH2 54 ale aerului la intrarea în ansamblul de pile 100 , precum și temperatura T6 56 și presiunea P4 57 ale fluidului la ieșirea catodică, și nivelul apei L2 58 în condensorul 42 .	1
În momentul în care nivelul L2 58 al apei în condensorul 42 atinge o anumită valoare prescrisă, Lmax, CPA 200 comandă deschiderea electrovalvei 44 și pornirea pompei 43 ; când nivelul L2 58 atinge valoarea Lmin, CPA 200 comandă închiderea electrovalvei 44 și oprirea pompei 43 .	9
Energia electrică furnizată de APC 100 alimentează sarcina 1 prin intermediul unui convertor DC-DC 4 care face adaptarea cu sarcina 1 și a unui convertor DC-AC 2 care transformă energia electrică de curent continuu în energie electrică de curent alternativ, respectiv încarcă un sistem de baterii tampon 3 prin intermediul aceluiași convertor DC-DC 4 . În funcție de regimul sarcinii 1 , staționar sau variabil, energia electrică necesară este furnizată de APC 100 , respectiv de sistemul de baterii tampon 3 pe durata necesară modificării parametrilor de operare ai APC 100 .	13
Adaptarea puterii furnizate cu cerințele sarcinii se realizează prin modificarea parametrilor de operare ai APC 100 , în funcție de puterea instantanee absorbită și de regimul de funcționare a sarcinii.	15
Pe circuitul de sarcină se măsoară curentul I_{FC} 6 și tensiunea U_{FC} 5 la ieșirea APC 100 de tip PEM, curentul absorbit de sarcina 1 , I_{sar} 7 , precum și curentul I_{bat} 9 și tensiunea de încărcare U_{bat} 8 ale bateriei 3 .	17
Dacă regimul de funcționare al stației energetice este unul static, în care sarcina se află în regim permanent (curentul electric absorbit este practic constant), debitul de hidrogen la anod se reglează în mod discontinuu, valoarea sa fiind dată de perioada și de factorul de umplere al semnalului de comandă modulat PWM (Pulse Width Modulation) generat de CPA 200 .	19
Dacă regimul de funcționare al stației energetice este unul dinamic, în care sarcina se află în regim tranzitoriu (curentul absorbit poate varia în ambele sensuri, cu viteze diferite) și în funcție de valoarea curentului absorbit I_{SAR} 7 , se stabilește modalitatea de reglare a debitului de hidrogen în regim continuu, astfel încât APC 100 să furnizeze la ieșire curentul cerut de sarcina 1 .	21
Debitul de agent oxidant - aer este dependent de debitul de hidrogen și se reglează astfel încât să se asigure în permanență raportul stoichiometric al celor două debite de alimentare, hidrogen și aer. Pe durata regimurilor tranzitorii ale sarcinii, asigurarea necesarului de putere cerut de consumator se face utilizând bateria 3 .	23
În schema bloc din fig. 2 se prezintă controlerul programabil de automatizare CPA 200 .	25
Acesta este un sistem industrial cu microcontroler care se compune dintr-o parte software și o parte hardware specifică și adaptată să funcționeze în medii industriale. Schema bloc a CPA este prezentă în fig. 2. Partea hardware a CPA este compusă dintr-un controler C1_1 cu sistem de operare în timp real, un modul analogic de măsurare a temperaturii C1_2 , două module analogice de citire semnale de la senzorii C1_3 și C1_4 , un modul analogic de	27

comandă elemente de execuție **C1_5**, un modul digital de comandă factor de umplere **C1_6**, un modul digital de comandă On/Off **C1_7** și un modul digital de citire ON/Off **C1_8**. Aceste module permit interconectarea semnalelor provenite de la senzorii și elementele de comandă și execuție ale stației energetice.

Controlerul **C1_1** reprezintă partea cea mai importantă CPA **C1** și este compus dintr-un procesor cu frecvență de 400 MHz, o memorie RAM de 128 MB, o memorie nevolatilă de 2 GB și un port Ethernet ce permite conectarea CPA **200** la un calculator **300** tip PC. Algoritmii de reglare ai buclelor de control sunt implementați în memoria **C1_1**, prin utilizarea soluției - Field-Programmable Gate Array (FPGA), care poate executa simultan până la 20 de bucle de control de tipul Proportional-Integrativ-Derivativ (PID) și fuzzy, la o rată de 100 kHz.

Modulul de citire temperaturi **C1_2** permite conectarea directă a senzorilor de temperatură de tip termocuplu utilizând compensarea hardware a joncțiunii reci. **C1_2** are caracteristica de filtrare și rejectare a zgomotului pe 50/60 Hz. Frecvența de citire a semnalelor este de 100 citiri/s cu o precizie de 0,1°C. Pentru conversia semnalelor se folosește un convertor analogic digital pe 16 biți de tip sigma/delta. Modulul are 8 canale de intrare, semnalele fiind următoarele: canalul 1 - T1 temperatura **31** umidificator **21** hidrogen, canalul 2 - T2 temperatura **32** traseu **39** încălzit intrare anod, canalul 3 - T3 temperatura **36** la ieșire anod, canalul 4 - T4 temperatura **51** umidificator aer, canalul 5 - T5 temperatura **52** traseu **59** încălzit intrare catod, canalul 6 - T6 temperatura **56** ieșire catod, canalul 7 - T7 temperatura **13** pe APC **100** și canalul 8 - T8 temperatura **14** pe schimbătorul de căldură al sistemului de încălzire/răcire **10**. Senzorii de temperatură sunt termocupluri de tipul K.

Modulele analogice de citire senzori **C1_3** și **C1_4** includ funcții hardware de amplificare a semnalului, filtrare, izolare electrică și multiplexare. Domeniul analogic de intrare este ± 10 V, o amplificare de 500 și un convertor analog-digital de 16 biți care are rezoluția de 153 μ V. Modulul **C1_3** are 8 canale de intrare, semnalele fiind următoarele: canalul 1 - P1 presiune **33** la intrare anod, canalul 2 - P2 presiune **37** la ieșire anod, canalul 3 - P3 presiune **53** la intrare catod, canalul 4 - P4 presiune **57** la ieșire catod, canalul 5 - P5 presiune **12** pe ieșire apă de răcire APC **100**, canalul 6 - RH1 umiditate **34** hidrogen la intrare anod, canalul 7 - RH2 umiditate **54** aer la catod. Senzorii de presiune utilizați sunt senzori cu transmitere ce au domeniu de intrare de 0...2,5 bar, iar semnalul electric de ieșire este de 0...10 V. Senzorii de umiditate sunt senzori capacitivi ce măsoară umiditate în flux continuu în domeniul 0...100%, iar semnalul electric de ieșire este de 0...1 V.

Modulul **C1_4** are 8 canale de intrare, semnalele fiind următoarele: canalul 1 - D debit de hidrogen la ieșire **61** anod, domeniu de măsură 0...20 SLPM, semnal 0...5 V, canalul 2 - D1 debit hidrogen la intrare **39** anod, domeniu de măsură 0...100 SLPM, semnal 0...5 V, canalul 3 - D2 debit aer la intrare **59** catod, domeniu de măsură 0...500 SLPM, semnal 0...10 V, canalul 4 - I_{sar} curent **7** consumat de sarcină, canalul 5 - I_{bat} curent **9** încărcare/descărcare baterie, canalul 6 - I_{FC} curent **6** generat de APC **100**, canalul 7 - U_{FC} tensiune **5** generată de APC **100** și canalul 8 - U_{bat} tensiune **8** pe magistrala DC/baterie. Senzorii de curent sunt senzori de tipul Hall și au domeniul de măsură 0...200 A și semnalul de ieșire 0...5 V. Senzorii de tensiune sunt de tipul divizori de tensiune și măsoară tensiuni în domeniul 0...100 V, semnalul de ieșire fiind 0...10 V.

Modulul analogic de comandă actuatori **C1_5** este implementat cu un convertor digital analog pe 16 biți, fiecare ieșire fiind definită de o buclă de reglare prin program și prin natura semnalului furnizat de 0...10 V sau de 4...20 mA. Modulul analogic de ieșire permite conectarea modulului **C1_5** la elemente de preacționare pentru a acționa funcții de comandă

și de reglare. Modulul C1_5 are 4 canale de ieșire, semnalele fiind următoarele: canalul 1 - cmdAO1 comanda regulator presiune de intrare, semnalul de comandă este de 0...5 V, iar domeniul regulatorului de presiune este de 0...5 bar; canalul 2 - cmdAO2 comanda regulator debit hidrogen la ieșire, semnalul de comandă este de 0...10 V, iar domeniul regulatorului de debit este de 20 SLPM; canalul 3 - cmdAO3 comanda tensiune magistrală DC/baterie, semnalul de comandă este de 0...10 V, iar ieșirea convertorului DC-DC este de 48...56 VDC; canalul 4 - cmdAO4 comanda debit de apă răcire APC 100 , semnalul de comandă este de 0...5 V, iar domeniul de variație al debitului pompei de apă este 0...20 LPM.	1
Modulul digital de comandă a factorului de umplere C1_6 este implementat cu posibilitatea de modificare în trepte a frecvenței: 500 Hz, 5 KHz și 15MHz, cu factor de umplere variabil de la 0 la 100% a semnalului de comandă digital.	3
Modulul C1_6 este utilizat pentru comanda releelor de putere de pe circuitele de încălzire ale stației energetice și ale blowerului 40 de pe intrarea 59 catodică a APC 100 . Modulul C1_6 are 4 canale de ieșire, semnalele fiind următoarele: canalul 1 - cmdPWM1 comanda încălzire umidificator 21 hidrogen, frecvența semnal 500 Hz, canalul 2 - cmdPWM2 comanda încălzire umidificator 41 aer, frecvența semnal 500 Hz, canalul 3 - cmdPWM3 comanda încălzire apă APC 100 , frecvența semnal 5 KHz și canalul 4 - cmdPWM4 comanda debit aer la intrare 59 catod, frecvența semnal de 15 KHz.	5
Modulul digital de comandă On/Off C1_7 acționează asupra elementelor de acționare de tip releu. C1_7 este compus din 6 canale: canalul 1 - cmdDO1 comanda digitală pompa 25 apă la anod, canalul 2 - cmdDO2 comanda digitală electrovalva 26 , pompă apă anod, canalul 3 - cmdDO3 comanda digitală pompa 43 apă la catod, canalul 4 - cmdDO4 comanda digitală electrovalva 44 , pompă apă catod, canalul 5 - cmdDO5 comanda electrovalva 15 răcire APC 100 și canalul 6 - cmdDO6 comanda purjare 30 anod.	7
Modulul digital de citire semnale On/Off C1_8 are funcția de a citi semnale de tipul On/Off, în cazul de față: On = 24 V, iar Off = 0 V. Modulul C1_8 are două canale: canalul 1 - L1 nivel 38 apă condensor 22 anod și canalul 2 - L2 nivel 58 apă condensor 42 catod.	9
În fig. 3 se prezintă schema logică a rutinei R1 - programul principal de monitorizare, comandă și control al funcționării stației energetice de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM.	11
Rutina R1 este implementată într-un mediu de programare orientat pe instrumentație virtuală, pagina principală a acesteia fiind prezentată în fig. 10. R1 rulează pe un calculator 300 conectat la un controler programabil de automatizare C1 200 cu o ciclicitate de 10/s.	13
Rutina R1 cuprinde 6 subrutine și 5 blocuri decizionale.	15
Lansarea rutinei R1 se realizează la comanda operatorului. Primele secvențe urmăresc aducerea APC 100 la temperatura și gradul de umidificare nominale, prin intermediul subrutinei R2, respectiv R3.	17
Prin intermediul blocului decizional R1_1 se verifică temperatura de funcționare a APC 100 . Temperatura se măsoară pe canalul 7 al modulului analogic C1_2 . Trecerea la nivelul următor se realizează numai după ce temperatura a atins valoarea de 80°C.	19
Prin intermediul blocului decizional R1_2 se verifică gradul de umidificare al reactanților. Pentru hidrogen, umiditatea se măsoară pe canalul 6 al modulului analogic C1_3 , iar pentru aer, pe canalul 7 al aceluiași modul. Trecerea la nivelul următor se realizează numai după ce gradul de umidificare a atins valoarea de 80% atât pentru hidrogen, cât și pentru aer.	21
Pe nivelul următor se testează valoarea parametrilor de funcționare nominali: tensiunea 5 și curentul 6 pe APC 100 , diferența de presiune anod-catod P1-P3, diferența de presiune intrare-ieșire atât pe partea anodică P1-P2, cât și pe cea catodică P3-P4.	23

1 U_{FC} **5** se măsoară pe canalul 7 din modulul analogic **C1_4**, iar I_{FC} **6** pe canalul 6 al
aceluiași modul.

3 Presiunea P1 **33** la intrarea anodică se măsoară pe canalul 1 al modulului analogic
C1_3, iar cea de la ieșirea anodică, P2 **37**, pe canalul 2 al modulului analogic **C1_3**; presi-
5 nea la intrarea catodică P3 **53** se măsoară pe canalul 3 al modulului analogic **C1_3**, iar pre-
siunea P4 **57** la ieșirea catodică se măsoară pe canalul 4 al modulului analogic **C1_3**.

7 Dacă una dintre valorile măsurate se situează în afara intervalului admisibil pentru
parametri nominali ai APC **100**, se apelează subrutina de oprire controlată R7 a stației ener-
9 getice. În caz contrar, se monitorizează **R1_4** curentul de sarcină, I_{SAR} **7**. Dacă I_{SAR} = con-
stant, se apelează subrutina R4, de funcționare în regim static, iar în caz contrar, se
11 apelează subrutina R5, de funcționare în regim dinamic. Se apelează în continuare subrutina
R6, de recuperare a apei generate la electrozi.

13 Decuplarea stației energetice de mică putere se realizează la comanda operatorului
R1_5. În acest caz, se apelează subrutina de oprire controlată R7.

15 În fig. 4 se prezintă schema logică a subrutinei R2 de monitorizare, comandă și
control al temperaturii și presiunii de operare a APC **100**. Sistemul de gestionare a tempera-
17 turii și presiunii de funcționare a APC **100** (numit în continuare SGTP_APC) utilizează ca
agent termic (încălzire/răcire) apa deionizată cu o conductivitate mai mică de 17 μS la o
19 presiune mai mică de 0,5 bar și asigură o viteză de încălzire de până la 10°C/min. Încălzirea
APC **100** este realizată cu un circuit de rezistențe electrice, iar răcirea APC **100** este
21 realizată cu un schimbător de căldură ce utilizează ca agent termic de răcire apa dintr-un
circuit exterior. Trebuie ținut cont de faptul că, întrucât gazele de alimentare intră în APC **100**
23 la temperatura ambiantă, debitul acestora va influența echilibrul termic al APC **100**. Astfel,
pentru debite mici de alimentare, ceea ce corespunde funcționării APC **100** la densități mici
25 de curent, încălzirea APC **100** se face cu viteză mai mare decât în cazul în care debitele de
alimentare sunt mari, dacă se păstrează ceilalți parametri de operare nemodificați.

27 SGTP_APC este constituit dintr-un sistem de încălzire/răcire **10**, o pompă **11** de recir-
culare cu debit variabil pentru antrenarea agentului termic, un senzor de presiune **12** care
29 măsoară presiunea la ieșire circuitului de răcire a APC, un senzor de temperatură **13** care
măsoară temperatura la ieșirea catodică a APC, un senzor de temperatură **14** care măsoară
31 temperatura agentului termic, o electrovalvă **15** care controlează debitul agentului termic și
din sistemul de conducte de legătură aferent. Sistemul de încălzire/răcire include un vas de
33 apă demineralizată, circuitul de rezistențe electrice cu releu de control integrat și un schim-
bător de căldură, nereprezentate în fig. 1. SGTP_APC are și rolul de a asigura răcirea celor
35 două condensoare **22** și **42** pentru eliminarea apei din gazele reactante de la ieșirea APC
100. Apa care este colectată din gazele de ieșire ale APC **100** este reintrodusă în cele două
37 umidificatoare **21** și **41**.

Funcția SGTP_APC este aceea de a reduce durata de intrare în regim normal de
39 funcționare a APC **100**, în special în situațiile în care sunt prezente fluctuații de putere pe
sarcina **1**. Rolul SGTP_APC este de a stabili cât mai exact domeniul de temperatură și
41 presiune al agentului termic, astfel încât APC să funcționeze cu o eficiență cât mai ridicată.

Subrutina R2 este apelată din rutina de program principal R1. La momentul inițial se
43 citesc valorile temperaturii T7 **13** și presiunii P5 **12** a agentului de răcire al APC **100** **R2_1**.
Temperatura T7 **13** este măsurată cu un termocuplul de tip K, poziționat la ieșirea catodică
45 a APC **100**, de către modulul de citire temperaturi **C1_2** pe canalul 7 al controlerului progra-
mabil de automatizare C1. Presiunea P5 a agentului termic este măsurată cu un senzor de
47 presiune cu transmitter, poziționat la ieșirea circuitului termic al APC **100**, având domeniul

de măsură între 0 și 2,5 bar și semnal electric de ieșire între 0 și 5 V, de către modulul de intrări analogice **C1_3** canalul 5 al controlerului programabil de automatizare C1. Reglarea temperaturii și presiunii se face într-un sistem de reglare în cascadă, format dintr-o buclă exterioară în care se realizează reglajul de presiune și două bucle interioare, din care una este responsabilă cu procesul de încălzire și cealaltă cu procesul de răcire. Algoritmul de reglare se inițiază prin compararea presiunii P5 **12** cu o valoare prestabilită, $P = 0,5$ bar, în blocul de decizie **R2_2**. Reglarea presiunii este un proces care se realizează prin controlul debitului pompei **11**. Pompa are debitul în domeniul 0...20 LPM și este controlată de un semnal analogic de tensiune în domeniul 0...10 V generat de canalul 4 al modulului de ieșiri analogice **C1_5** al controlerului programabil de automatizare **200** C1. Regulatorul care execută bucla de reglare este de tipul PD (proporțional-derivativ) și este implementat în C1. Dacă rezultatul comparației **R2_2** este DA, se comandă acționarea pompei **11** **R2_3** din subrutina R2. Dacă rezultatul comparației **R2_2** este NU, adică presiunea $P5 > 0,5$ bar, se ajunge în blocul de decizie **R2_4** din interiorul sistemului de reglare în cascadă, în care se compară temperatura T7 **13** cu o valoare prescrisă de 65°C . Dacă temperatura T7 **13** este mai mică sau egală cu 65°C , se execută bucla de reglare **R2_5**, necesară pentru încălzirea APC **100**. Algoritmul de reglare a temperaturii este implementat într-un regulator de tip PID (proporțional - integral - derivativ) care compară temperatura T7 cu valoarea prestabilită și calculează parametrii PID optimi ce acționează asupra elementului de încălzire prin intermediul unui releu încorporat comandat în semnal PWM cu factor de umplere reglat din modulul **C1_6**, canalul 3 din C1. În bucla **R2_5**, elementul de execuție pentru răcirea APC **100** este întotdeauna decuplat. Dacă rezultatul comparației **R2_4** este NU, adică temperatura T7 este mai mare de 80°C , se execută bucla de reglare **R2_6** pentru răcirea APC **100**. Algoritmul de reglare este implementat într-un regulator de tipul ON-OFF. În această buclă, sistemul de încălzire cu rezistențe este decuplat. Răcirea se face cu apă dintr-un circuit exterior, care traversează un schimbător de căldură cu o putere de 4 kW, având rolul de a răci agentul termic din vasul cu apă demineralizată. Controlul debitului de apă din circuitul exterior este realizat cu ajutorul unui electroventil **15** de tip solenoid, care este comandat de un semnal digital de ieșire din canalul 5, modulul **C1_7**, al C1 **200**.

Energia termică extrasă din circuitul de răcire al APC **100** sub formă de apă caldă la temperatura de circa 60°C se poate recupera și utiliza într-un circuit exterior, ceea ce poate mări eficiența energetică a stației energetice de mică putere prin transformarea acesteia într-un sistem de cogenerare de energie electrică și termică.

În fig. 5 se prezintă schema logică a subrutinei R3 de stabilire și menținere a umidității gazelor de alimentare a ansamblului de pile de combustibil.

Sistemul de gestionare optimizată a umidificării reactanților din ansamblul de pile de combustibil este numit în continuare SUR_APC. Rolul SUR_APC este de a permite controlul optim al umidității gazelor reactante la intrările anodică **39** și catodică **59** ale APC **100**, printr-un sistem special de umidificare. Se cunoaște faptul că nivelul de umidificare al membranelor pilelor de combustibil de tip PEM influențează conductivitatea protonică, un nivel ridicat de umidificare favorizând transportul protonilor de la anod la catod, deci creșterea puterii generate. Nivelul de umidificare al membranelor rezultă în urma determinării soluției de compromis între valorile mari ale umidității, care determină creșterea pierderilor rezistive prin membrana și valorile reduse, care reduc conductivitatea protonică a membranei. Metoda de umidificare utilizată este cea prin care se realizează umidificarea reactanților, umiditatea transportată de aceștia realizând umidificarea membranelor.

Umidificatoarele utilizate în SUR_APC sunt sub forma unui schimbător de căldură tubular, cu un ansamblu de tuburi cuprinse într-o manta, realizate din membrană Nafion. Hidrogenul, respectiv aerul, circulă prin interiorul tuburilor, iar apa deionizată încălzită, prin interiorul mantalei și exteriorul tuburilor. Transportul apei prin pereții tuburilor este determinat de diferența de presiune parțială a acesteia. Unul din avantajele principale ale acestui tip de umidificator este că transferul de apă nu poate depăși saturația, valoarea umidității fiind dată de temperatura apei deionizate. De asemenea, umidificatorul acționează ca un filtru pentru eventualele impurități din apă, pe care nu le lasă să treacă în gaz.

Sistemele de umidificare a reactanților pe partea anodică (hidrogen) și pe partea catodică (aer) a APC **100** sunt identice. Se prezintă SUR_APC pentru alimentarea cu hidrogen pe partea anodică a APC **100**, care este constituit dintr-un umidificator **21**, o pompă de recirculare **25**, un electroventil **26**, sistemul de răcire/încălzire **10**, un senzor de temperatură T1 **31**, un senzor de presiune P1 **33**, un senzor de debit D1 **35**, un senzor de umiditate RH1 **34**, un senzor de temperatură T2 **32** poziționat la intrare anodică și sistemul de conducte de legătură aferent. Conexiunea între umidificatorul **21** și anodul **39** este încălzită și izolată termic pentru evitarea condensării vaporilor în interiorul conductei.

Rolul SUR_APC este de a optimiza gradul de umidificare al membranei. Umiditatea hidrogenului este în funcție de temperatura apei deionizate din umidificator. Principala cauză a modificării temperaturii este reprezentată de creșterile bruște ale fluxului de hidrogen necesare pentru a susține creșterile de putere solicitate de sarcina **1** (consumator). Subrutina responsabilă pentru menținerea gradului optim de umectare, R3, este apelată din rutina programului principal R1. În continuare, se prezintă modul de apelare al subrutinei R3 pentru partea anodică, cel pentru partea catodică fiind identic. La momentul inițial, **R3_1** citește valoarea temperaturii T1 **31** pe umidificatorul **21** de hidrogen și umiditatea RH1 **34** a hidrogenului la intrarea anodică a APC **100**. Temperatura T1 **31** este măsurată cu un termocuplu tip K, al cărui semnal este monitorizat pe canalul 1 din modulul analogic de temperaturi **C1_2** al controlerului C1. Umiditatea hidrogenului este măsurată în flux continuu în domeniul 0...100%, de către senzorul RH1 montat la intrarea anodică, iar semnalul electric de ieșire de 0...1 V este citit pe canalul 6 din modulul **C1_3**. Pentru controlul optim al umidității, se folosește un sistem de reglare în cascadă constituit dintr-o buclă exterioară care controlează temperatura umidificatorului și o buclă interioară responsabilă cu calculul optim al umidității. Algoritmul de reglare se inițiază prin compararea temperaturii T1 cu valoarea prestabilită, $T = 80^{\circ}\text{C}$, în blocul de decizie **R3_2**. Dacă valoarea temperaturii $T1 < 80^{\circ}\text{C}$, se comandă încălzirea apei deionizate **R3_3** utilizând un regulator de temperatură pentru care acordarea parametrilor PID a fost calculată cu un timp de răspuns foarte mic, chiar dacă se riscă eventual depășirea valorii presetate a temperaturii. În momentul în care $T1 > 80^{\circ}\text{C}$, subrutina R3 va testa **R3_4** valoarea umidității măsurate cu senzorul de umiditate RH1 **34**. Dacă aceasta este mai mică sau egală cu 80%, încălzirea umidificatorului va continua **R3_5** cu parametrii PID modificați, pentru a obține o stabilitate mai bună a temperaturii. Dacă umiditatea va depăși valoarea de 80%, sistemul de încălzire este decuplat **R3_6**. Algoritmul de reglare a temperaturii este implementat într-un regulator de tip PID care permite modificarea parametrilor de acordare în funcție de condițiile din subrutina R3 și acționează asupra elementului de încălzire prin intermediul unui releu încorporat comandat în semnal PWM cu factor de umplere comandat de canalul 1 al modulului **C1_6**.

Sistemul SUR_APC permite obținerea unui control optim al umidității gazelor într-un timp cât mai scurt, prin utilizarea unui regulator de tip cascadă care realizează modificarea parametrilor PID în funcție de temperatura umidificatorului și de gradul de umidificare al reactanților.

În fig. 6 se prezintă schema logică a subrutinei R4 de comandă și control al funcționării în regim static a stației energetice de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM. Subrutina R4 se utilizează pentru comanda stației energetice de mică putere atunci când curentul absorbit de sarcină este constant în timp, situație care definește regimul static de funcționare. În această situație, funcționarea electrovalvei **30** este setată pe modul discontinuu, controlul valorii debitului de hidrogen necesar pentru generarea la ieșirea APC **100** a valorii curentului cerut de sarcină realizându-se prin modificarea frecvenței și a factorului de umplere ale semnalului de comandă a alimentării, realizate prin intermediul unui regulator fuzzy implementat în controlerul programabil de automatizare C1 **200**.

La momentul inițial, se citesc **R4_1** valorile următorilor parametri: temperatura T7 **13** la ieșirea catodică a APC **100**, curentul IFC **6** furnizat de APC **100**, tensiunea UFC **5** pe APC **100**, presiunea P1 **33** la intrarea anodică, presiunea P2 **37** la ieșirea anodică, debitul de hidrogen D1 **35** la intrarea anodică, tensiunea pe baterie U_{BAT} **8** și curentul pe baterie I_{BAT} **9**.

Pe baza valorilor achiziționate, programul de calcul calculează **R4_2** debitul de hidrogen D, necesar pentru generarea puterii cerute de sarcină, ținând cont de stoichiometria prescrisă.

Debitele de hidrogen și aer consumate de APC **100** se calculează din legea lui Faraday, considerând că gazele reactante se supun legii gazelor ideale. În funcție de regimul de funcționare, static sau dinamic, se utilizează pentru stoichiometrie valoarea de 1,1, respectiv 1,5 la anod și 2,0 la catod.

$$Debit_{hidrogen_calculat} = \frac{\lambda_{hidrogen} \cdot I \cdot n_{cell} \cdot R \cdot T \cdot 1000 \cdot 60}{P_{anod} \cdot z_{hidrogen} \cdot F} [SLPM]$$

$$Debit_{Aer_calculat} = \frac{\lambda_{aer} \cdot I \cdot n_{cell} \cdot R \cdot T \cdot 1000 \cdot 60}{P_{catod} \cdot z_{aer} \cdot F} \cdot \frac{1}{0.209} [SLPM]$$

Unde: $n_{cell} = 40$, $z_{hidrogen} = 2$, $z_{aer} = 4$, $F = 96485 \text{ As/mol}$, $R = 8.3145 \text{ J/molK}$

I - curentul generat de APC în [A];

T - temperatura de funcționare a APC în [K];

P - presiunea la anod în [Pa].

Secvența de comandă a electrovalvei **30**, care va deschide periodic ieșirea circuitului anodic al APC, este comandată și controlată de către regulatorul fuzzy implementat în C1.

Regulatorul fuzzy este proiectat în cinci pași.

În pasul unu se definesc variabilele de intrare/ieșire ale regulatorului. Prima variabilă de intrare este diferența, notată ΔD , dintre debitul de hidrogen la intrare D1 **35** și debitul de hidrogen D calculat anterior **R4_2**, care se calculează conform relației $\Delta D = D1 - D$; a doua variabilă de intrare este diferența de presiune dintre presiunea citită la intrarea anodică P1 **33** și presiunea citită la ieșirea anodică P2 **37**, notată ΔP și calculată conform relației $\Delta P = P1 - P2$; a treia variabilă de intrare este valoarea curentului generat de APC, I_{FC} **6**, iar a patra variabilă de intrare este tensiunea pe APC, U_{FC} **5**. Prima variabilă de ieșire este durata dintre două purjări, notată t_{2_purje} , iar a doua variabilă de ieșire este durata purjării t_{purje} .

În pasul doi se stabilesc variabilele lingvistice asociate celor patru intrări ale regulatorului fuzzy ca fiind cinci termeni lingvistici cu funcții de apartenență de formă triunghiulară, iar celor două variabile de ieșire ale regulatorului fuzzy li se asociază șapte termeni lingvistici cu funcții de apartenență de formă trapezoidală.

În pasul trei se realizează implementarea bazei de reguli care este formată din 185 de reguli. Baza de reguli a fost stabilită în urma mai multor experimente, astfel încât acesta să acopere întreg spectrul de acțiuni dorit.

În pasul patru se utilizează metoda MAX-MIN a lui Mamdani pentru evaluarea inferențelor, iar defuzzificarea comenzilor vagi are loc pe baza centrului de greutate.

Rolul regulatorului fuzzy este de a stabili cât mai corect durata între două purjări ale electroventilului **30** și durata cât acesta rămâne deschis, ambele depinzând de puterea generată de APC **100**. De exemplu, la puteri mici (100 W), intervalul dintre două purjări este de 300 s, iar durata de purjare 0,5 s, iar la puteri mari (5 kW) intervalul dintre două purjări este de 20 s, iar durata de purjare 2 s.

În pasul următor se verifică starea de încărcare a bateriei, SoC (State of Charge). SoC se exprimă în procente și definește cantitatea de energie din total, disponibilă în baterie. Pentru determinarea SoC au fost folosite metode de indicare a stării de încărcare care se bazează pe măsurarea și integrarea curentului, în funcție de rata de autodescărcare, temperatură, eficiența încărcării și descărcării. Valorile SoC sunt stocate tabelar.

În blocul decizional **R4_4** se verifică dacă SoC este mai mic decât 60%. În caz afirmativ, înseamnă că bateria este defectă și CPA **200** execută rutina de oprire **R7**, iar în caz negativ, se verifică în blocul decizional **R4_6** dacă valoarea stării de încărcare este mai mică decât 80%. În caz afirmativ, bateria se încarcă **R4_7** cu un curent de 20·Inominal, iar în caz negativ, bateria se încarcă **R4_8** cu un curent de 10·Inominal. În cazul în care SoC = 100%, CPA decuplează de stația energetică sistemul de baterii (care este încărcat).

În fig. 7 se prezintă schema logică de funcționare în regim dinamic a stației energetice de mică putere.

Subrutina R5 se utilizează pentru comanda stației energetice de mică putere atunci când curentul absorbit de sarcină variază în timp, situație care definește regimul dinamic de funcționare.

Regimul dinamic de funcționare are loc pe durata regimului tranzitoriu care apare la modificarea într-un sens sau altul a puterii absorbite de sarcina **1** și se caracterizează prin durata relativ redusă. Răspunsul sistemului, în acest caz, se produce prin reglarea continuă a debitului de hidrogen de alimentare a APC **100**, cu o stoichiometrie mărită la valoarea de 1,5 care să favorizeze adaptarea rapidă la variațiile sarcinii. Pe durata persistenței regimului dinamic de funcționare, având în vedere inerția inerentă a răspunsului APC **100** la modificarea sarcinii **1**, care este de 3 până la 5 s, energia necesară este furnizată consumatorului **1** de bateria **3**, care acționează ca tampon.

La momentul inițial se citesc **R5_1** valorile următorilor parametri: temperatura T7 **13**, curentul IFC **6** furnizat de APC, tensiunea U_{FC} **5** pe APC, presiunea P1 **33** la intrarea anodică, presiunea P3 **53** la intrarea catodică, debitul de hidrogen D1 **35** la intrarea anodică, debitul de hidrogen D3 **30** la ieșirea anodică, debitul de aer D2 **55** la intrarea catodică, tensiunea pe baterie U_{BAT} **8** și curentul pe baterie I_{BAT} **9**, curentul de sarcină I_{SAR} **7**.

Se verifică starea de încărcare a bateriei **R5_2**, SoC.

Dacă $SoC > 80\%$, se cuplează bateria **3** în circuitul de sarcină **R5_3**, iar în caz contrar, se comută funcționarea sistemului în regim static **R5_4**.

Se calculează valoarea curentului necesar a fi furnizat de către APC **100** **R5_5**, ca diferență între curentul de sarcină și curentul furnizat de baterie, $I_{SAR} - I_{BAT}$.

Se calculează **R5_6** valorile debitelor de hidrogen și aer necesare pentru generarea curentului absorbit de sarcina **1**.

Se comută R5_7 regimul de funcționare al electrovalvei 30 pe funcționare continuă.	1
Se determină valoarea debitului de hidrogen utilizat pentru generarea curentului absorbit de sarcină, ca diferență între valorile măsurate ale debitelor de hidrogen de la intrarea D1 35 și de la ieșirea D3 30 a APC 100 .	3
Se compară R5_9 valoarea curentului generat de APC 100 , I _{FC} , cu valoarea calculată în pasul R5_5 .	5
Dacă valoarea curentului generat de APC 100 , I _{FC} , este mai mică decât valoarea calculată, ceea ce înseamnă că APC 100 singur nu este momentan capabil să furnizeze puterea cerută, se comută regimul de funcționare în regim static.	7
În fig. 8 se prezintă schema logică a subrutinei R6 de recuperare a apei generate în APC 100 .	9
Așa cum s-a arătat, pe partea catodică a celulei de combustibil se produce apa în urma reacției dintre ionii de hidrogen (protoni) formați la anod, care trec prin electrolitul solid (membrana), și oxigenul din aerul furnizat la catod. Astfel, pe membrana pilei de combustibil se produce o diferență a presiunii parțiale a vaporilor de apă care favorizează fenomenul așa-numit de difuzie retrogradă (retrodifuzie) a apei de la catod (unde s-a format), prin membrană, la anod. Apa formată la catod, la fel ca și cea migrată prin membrană la anod, este o apă ultrapură, ale cărei proprietăți o fac potrivită pentru utilizarea în dispozitivele de umidificare a reactanților. Recuperarea și utilizarea acestora în umidificatoare va contribui la diminuarea aportului exterior de apă deionizată.	11
Sistemele de recuperare a apei generate la catodul și anodul APC 100 , SRA_APC, sunt identice. Sistemul de recuperare a apei de la catod cuprinde: un condensor 42 răcit prin intermediul SGTP_APC, care are rolul de a condensa vaporii de apă generați la catodul APC 100 ; electroventilul 44 ; pompa de recirculare 43 ; senzor de nivel minim-maxim L2 58 pe condensor 42 ; conductele de legătură aferente.	13
Sistemul SRA_APC are rolul de a condensa, colecta și întoarce în circuitul umidificatorului 41 apa generată la catodul, respectiv anodul APC.	15
Rutina R6 se inițializează prin citirea R6_1 stării senzorilor de nivel L1 38 , respectiv L2 58 în condensorul de la anod și în cel de la catod.	17
Se prezintă ramura decizională aferentă catodului, ramura anodică fiind identică. Dacă nivelul de condens este maxim R6_6 , se comandă deschiderea R6_7 electroventilului 44 , și pornirea pompei de recirculare 43 , apa din condensorul 42 fiind introdusă în umidificatorul 41 . La sesizarea nivelului minim R6_8 în condensorul 42 , se comandă închiderea R6_9 electroventilului 44 , și oprirea pompei de recirculare 43 . Algoritmul de reglare este implementat într-un regulator de tipul ON-OFF în controlerul C1.	19
Având în vedere faptul că apa utilizată pentru umidificarea membranelor APC 100 nu se recuperează, prin intermediul SGTP_APC se reduce aportul exterior de apă deionizată necesară alimentării umidificatoarelor.	21
În fig. 9 se prezintă schema logică a subrutinei R7 de oprire controlată a stației energetice.	23
Subrutina R7 este apelată din rutina principală R1 în momentul în care se dorește închiderea controlată a stației energetice R1_5 sau când unul din parametrii stației energetice este în afara plajei de control. În primul pas R7_1 al subrutinei R7 se decuplează APC 100 de la circuitul electric al Convertorului DC-DC 4 prin trecerea în 0 V a semnalului de comandă de pe canalul 3 al modulului C1_5 din CPA 200 . În pasul următor R7_2 se închide alimentarea cu hidrogen a APC 100 prin închiderea regulatorului de presiune 24 de pe traseul anodic al APC 100 , comandă executată pe canalul 1 al modulului C1_5 din CPA 200 . În ultimul pas se oprește alimentarea cu aer a APC 100 , prin oprirea blowerului 40 , comandă executată pe canalul 4 al modulului C1_6 din CPA 200 .	25
În fig. 10 se prezintă interfața software pentru monitorizarea, comanda și controlul funcționării stației energetice de mică putere realizată cu pile de combustibil de tip PEM.	27

Revendicări

1. Stație energetică de mică putere, realizată cu pile de combustibil de tip PEM, compusă din:

- un ansamblu (**100**) de pile de combustibil de tip PEM de mică putere;
- un sistem de gestiune a temperaturii de funcționare a ansamblului (**100**) de pile de combustibil de tip PEM;
- un sistem de gestiune optimizată a umidificării reactanților;
- un sistem de gestiune optimizată a alimentării cu hidrogen și aer în corelație cu sarcina;

- un sistem de monitorizare, comandă și control al funcționării stației energetice de mică putere, **caracterizată prin aceea că** ansamblul (**100**) de pile de combustibil este realizat dintr-o succesiune de pile de combustibil de tip PEM conectate în serie, intercalate cu plăci de răcire, cuprinse între două plăci colectoare, anod și catod, și două plăci de capăt, pentru a produce energie electrică utilizând hidrogen și aer.

2. Stație conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** sistemul de gestiune a temperaturii de funcționare a ansamblului (**100**) de pile de combustibil asigură menținerea temperaturii de funcționare a ansamblului (**100**) de pile de combustibil la o valoare inferioară temperaturii limită de 90°C, prin utilizarea de plăci de răcire realizate din grafit de înaltă densitate, prin canalizația cărora circulă apa deionizată.

3. Stație conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** plăcile de răcire ale ansamblului (**100**) de pile de combustibil se intercalează după fiecare a doua pilă de combustibil, dispunere care asigură temperatura de funcționare necesară ansamblului (**100**) de pile de combustibil pentru puteri de până la 5 kW.

4. Stație conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** sistemul de gestiune optimizată a umidificării reactanților realizează reducerea consumului de apă deionizată prin colectarea apei deionizate produse la catod și a celei obținute prin difuzie retrogradă la anod, utilizând condensorii (**42**), respectiv (**22**), reintroducând-o în circuitul de umidificare a reactanților.

5. Stație conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** sistemul de monitorizare, comandă și control al funcționării sale, realizat pe structura unui controler (**200**) programabil de automatizare, include un regulator fuzzy pentru comanda modificării debitului de combustibil în funcție de regimul sarcinii, consumatorii (**1**) stației.

6. Stație conform revendicării 5, **caracterizat prin aceea că** regulatorul fuzzy utilizează un algoritm de reglare a debitului de hidrogen bazat pe patru variabile de intrare, debit și presiune hidrogen, curent și tensiune pe sarcină, o bază cu 185 de reguli și două variabile de ieșire, și anume: durata de purjare a hidrogenului și intervalul de timp dintre două purjări succesive, pentru a genera un semnal digital modulat în durată a impulsului, semnal PWM, utilizat pentru comanda reglării debitului de hidrogen în funcție de necesarul de putere pe sarcină, consumatorii (**1**) stației.

7. Procedeu de optimizare și alimentare a consumului de hidrogen și aer pentru stația energetică de mică putere, revendicată mai sus **caracterizat prin aceea că** succesiunea de operații este următoarea:

- se selectează secvența de operare corespunzătoare regimului dinamic sau static de funcționare pentru adaptarea puterii furnizate de ansamblul (**100**) de pile de combustibil la necesarul de putere al consumatorilor, pe baza monitorizării cererii de energie pe sarcină;

RO 129407 B1

- se realizează alimentarea ansamblului (**100**) de pile de combustibil cu hidrogen în mod discontinuu pe perioadele când sarcina funcționează în regim static; 1
- se realizează alimentarea ansamblului (**100**) de pile de combustibil cu hidrogen în mod continuu pe intervalele de timp în care sarcina funcționează în regim dinamic; 3
- se comandă alimentarea ansamblului (**100**) de pile de combustibil în modul discontinuu de alimentare, cu un semnal PWM generat de către regulatorul fuzzy. 5

(51) Int.Cl.

H01M 4/86 (2006.01),

H01M 8/24 (2006.01),

H01M 8/04 (2006.01)

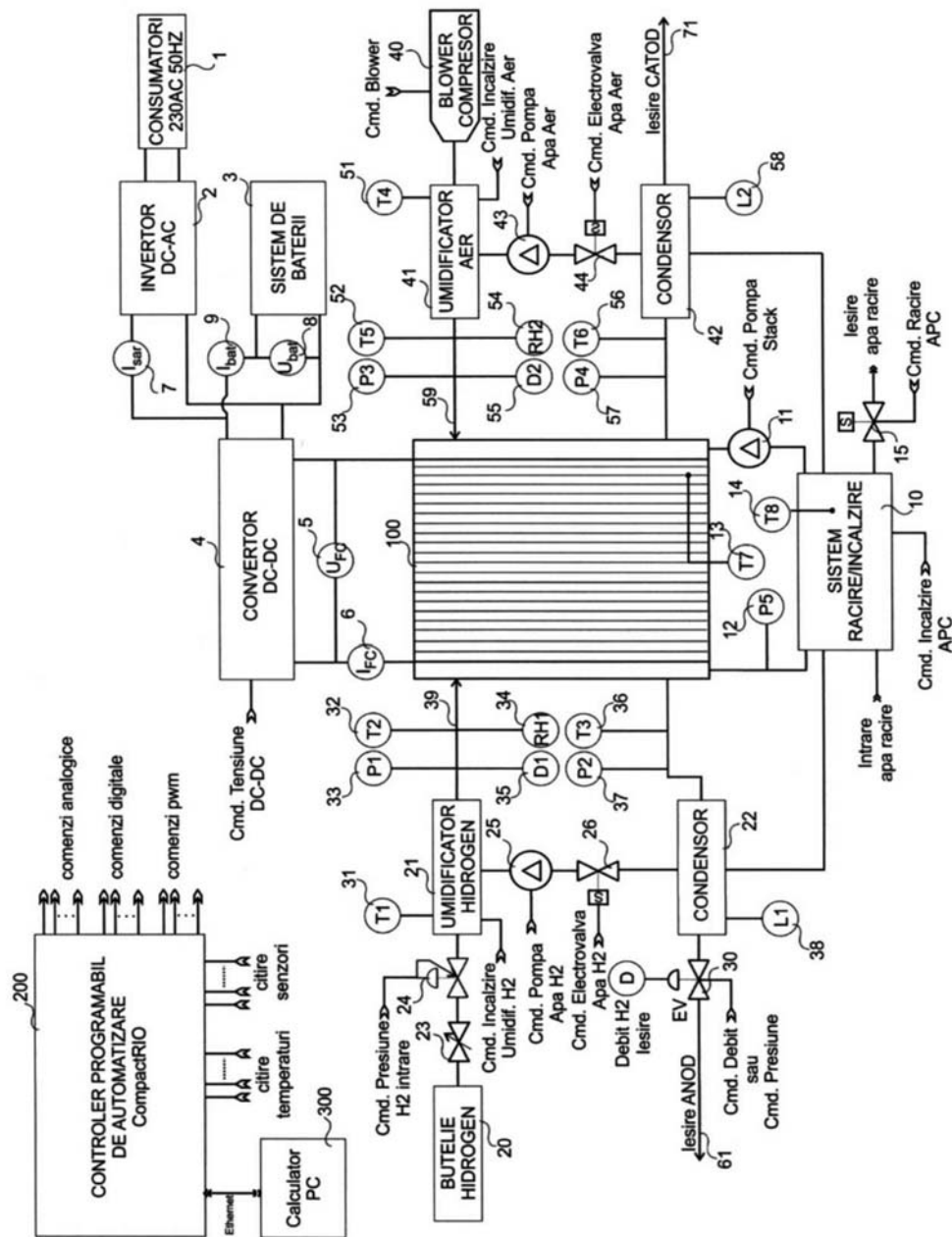


Fig. 1

(51) Int.Cl.

H01M 4/86 (2006.01),

H01M 8/24 (2006.01),

H01M 8/04 (2006.01)

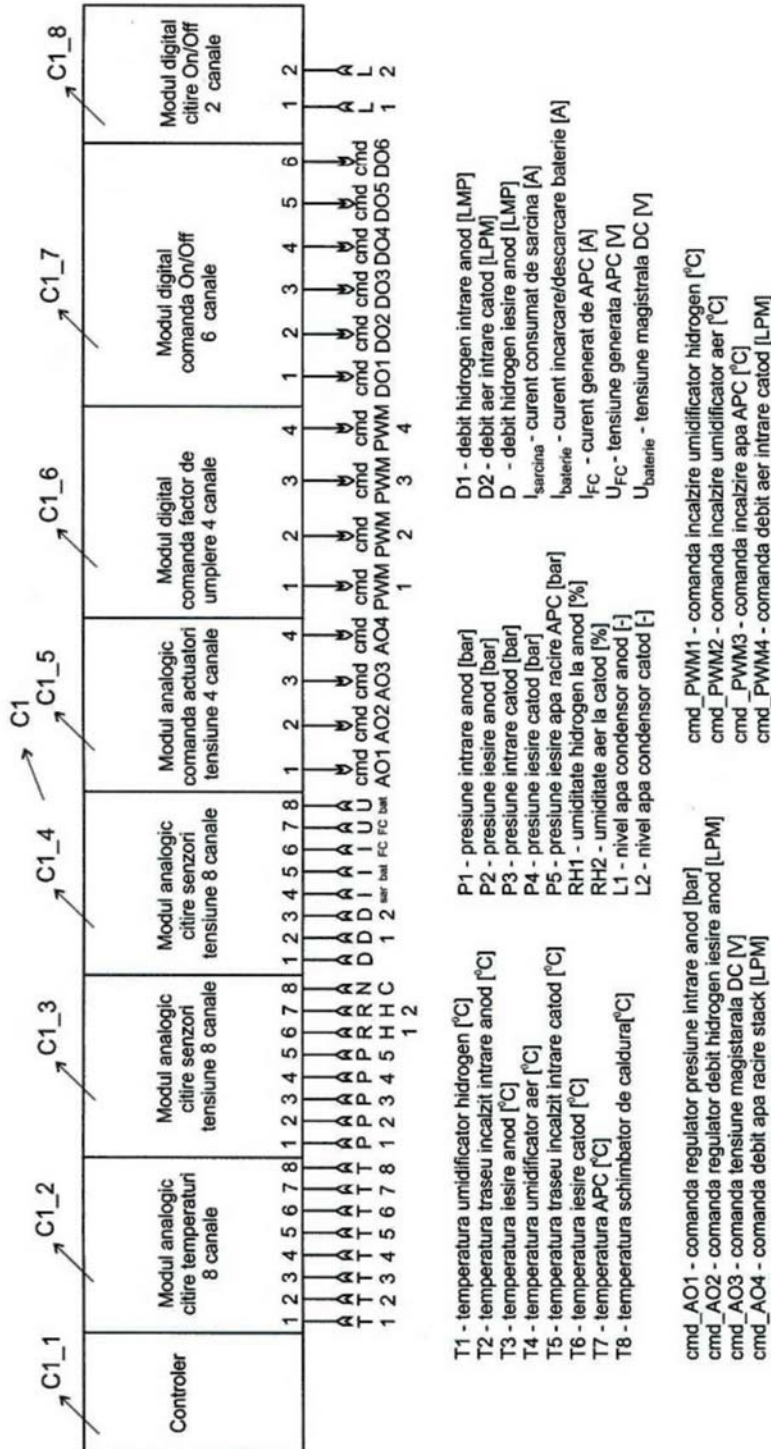


Fig. 2

(51) Int.Cl.

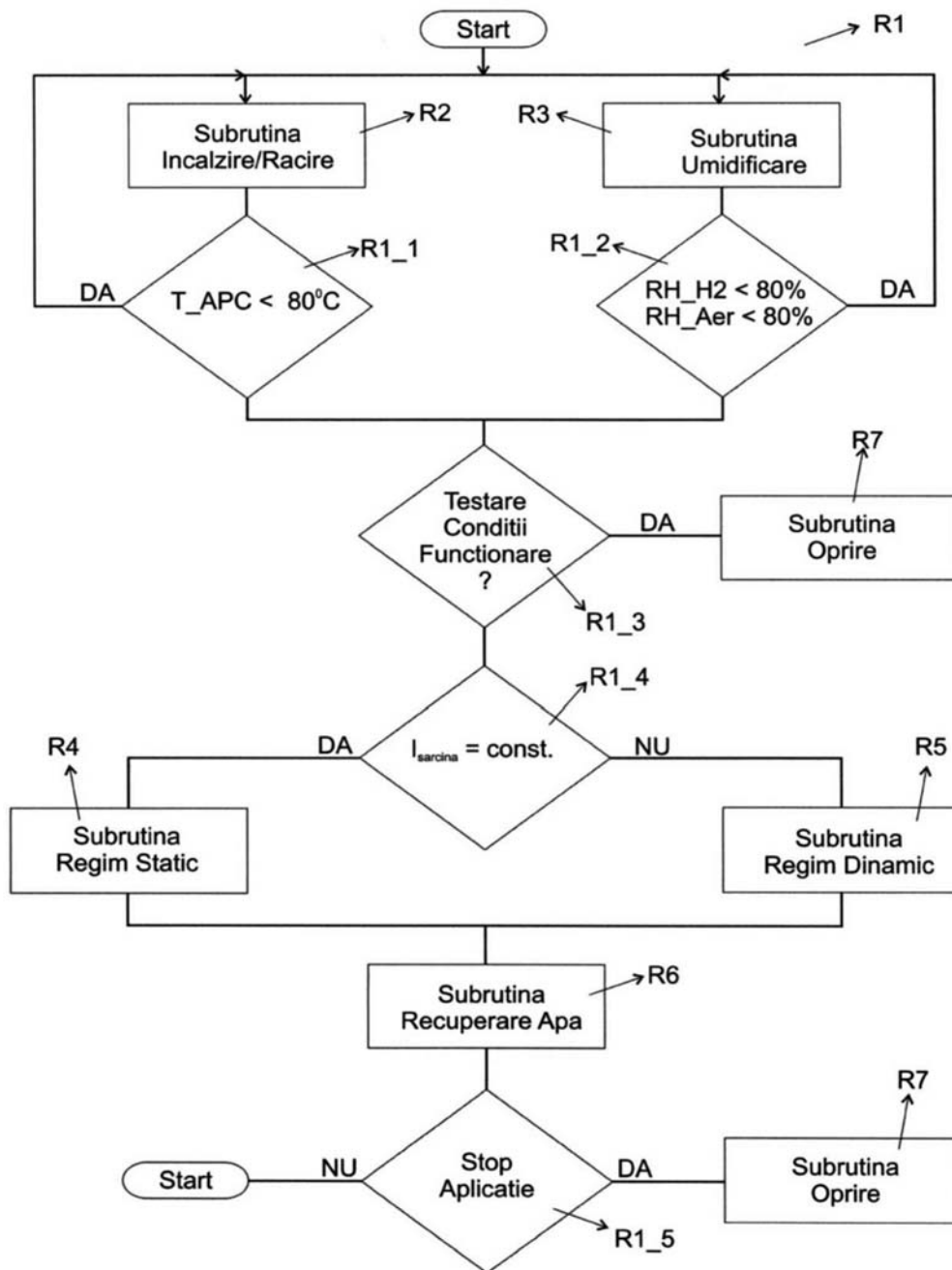
H01M 4/86 (2006.01);*H01M 8/24* (2006.01);*H01M 8/04* (2006.01)

Fig. 3

(51) Int.Cl.

H01M 4/86 (2006.01);

H01M 8/24 (2006.01);

H01M 8/04 (2006.01)

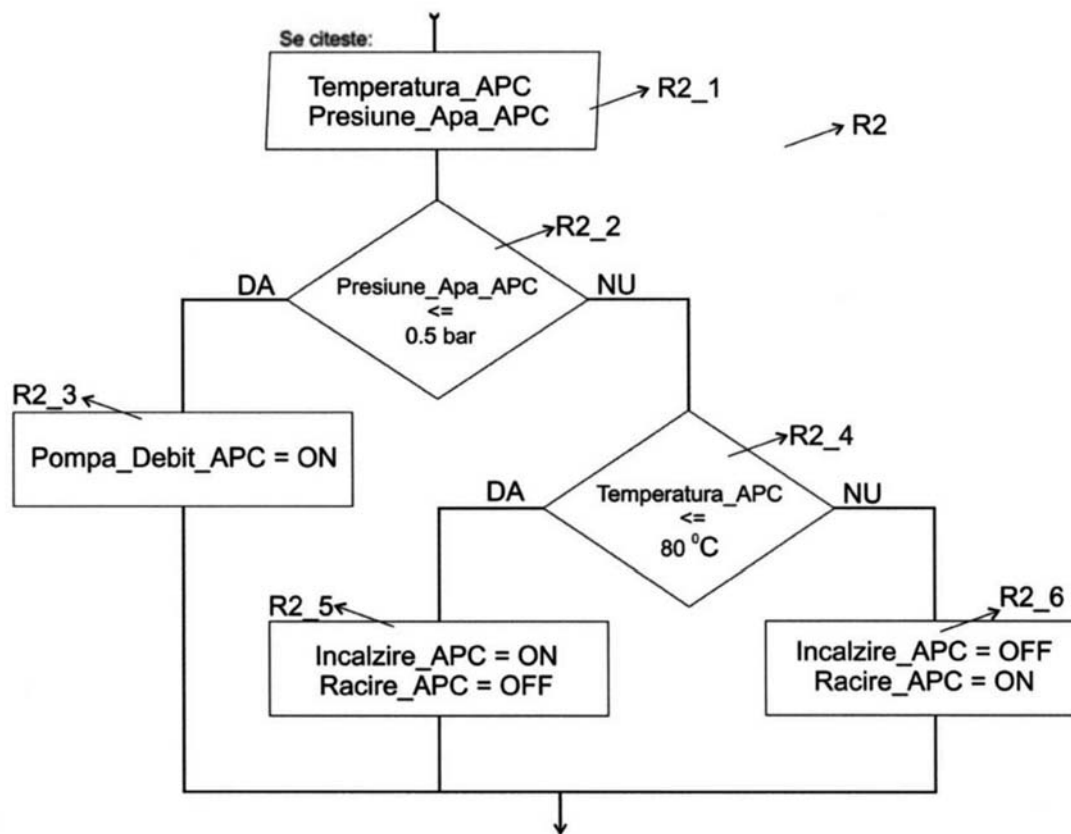


Fig. 4

(51) Int.Cl.

H01M 4/86 (2006.01).

H01M 8/24 (2006.01).

H01M 8/04 (2006.01)

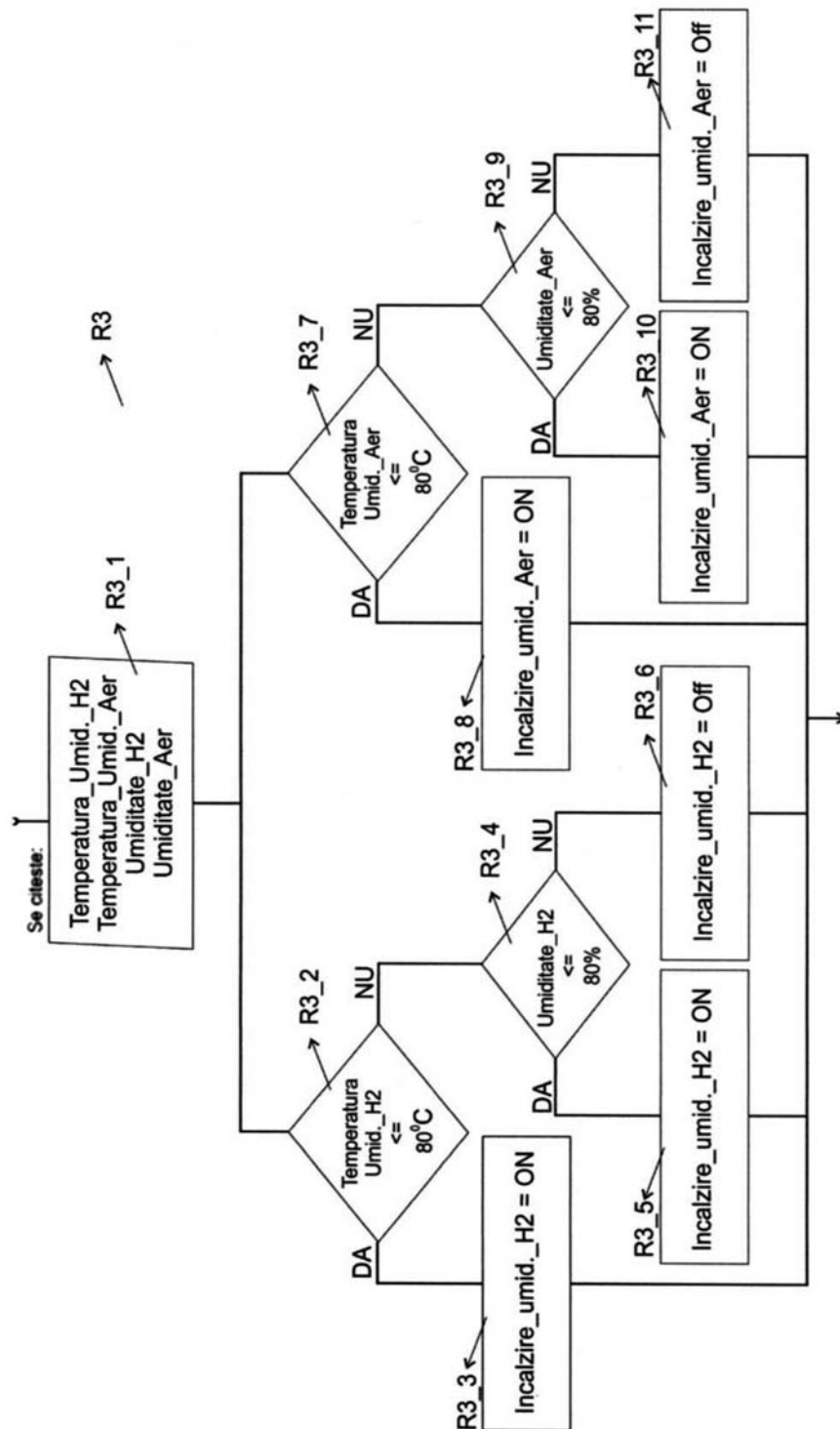


Fig. 5

(51) Int.Cl.

H01M 4/86 (2006.01);

H01M 8/24 (2006.01);

H01M 8/04 (2006.01)

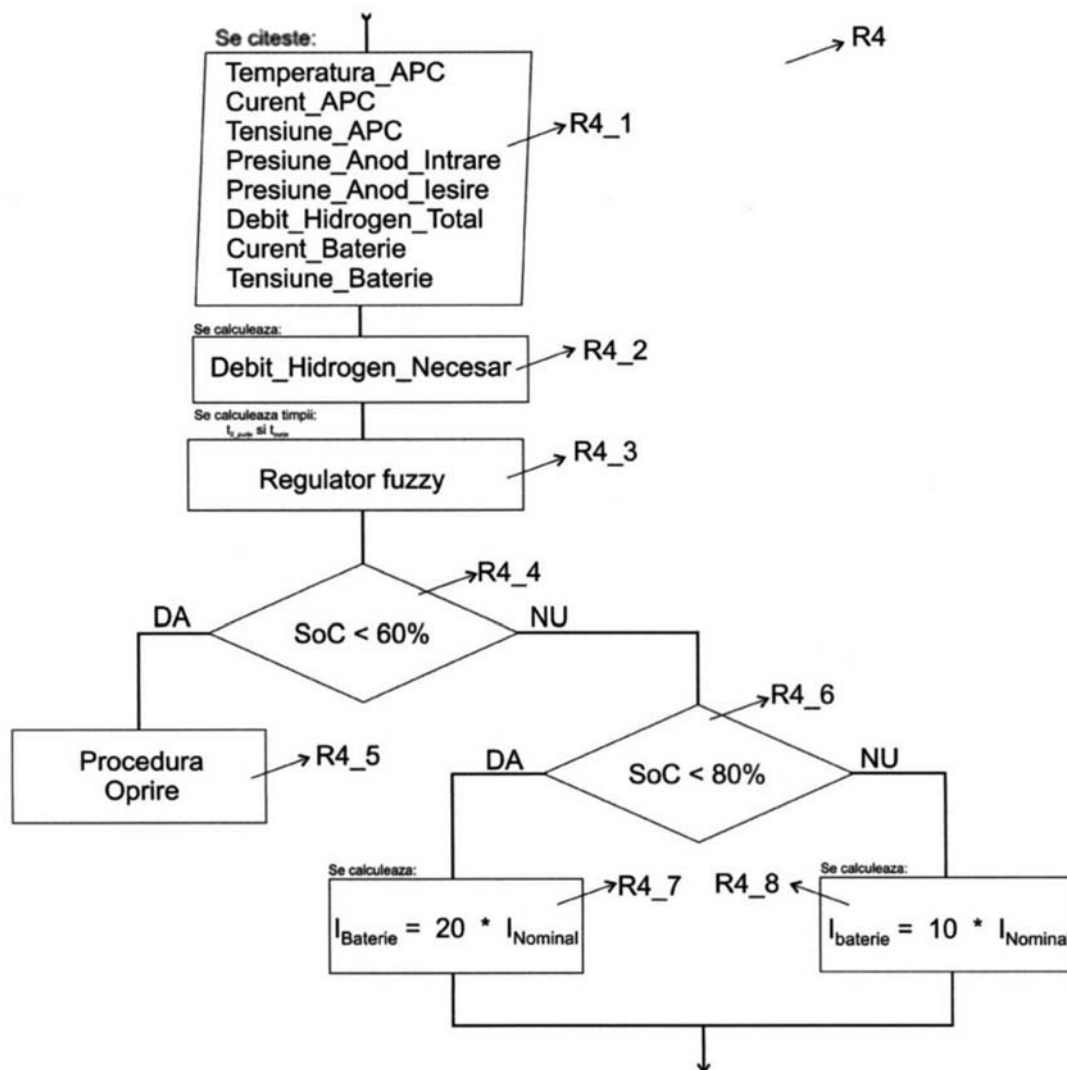


Fig. 6



(51) Int.Cl.
H01M 4/86 (2006.01),
H01M 8/24 (2006.01),
H01M 8/04 (2006.01)

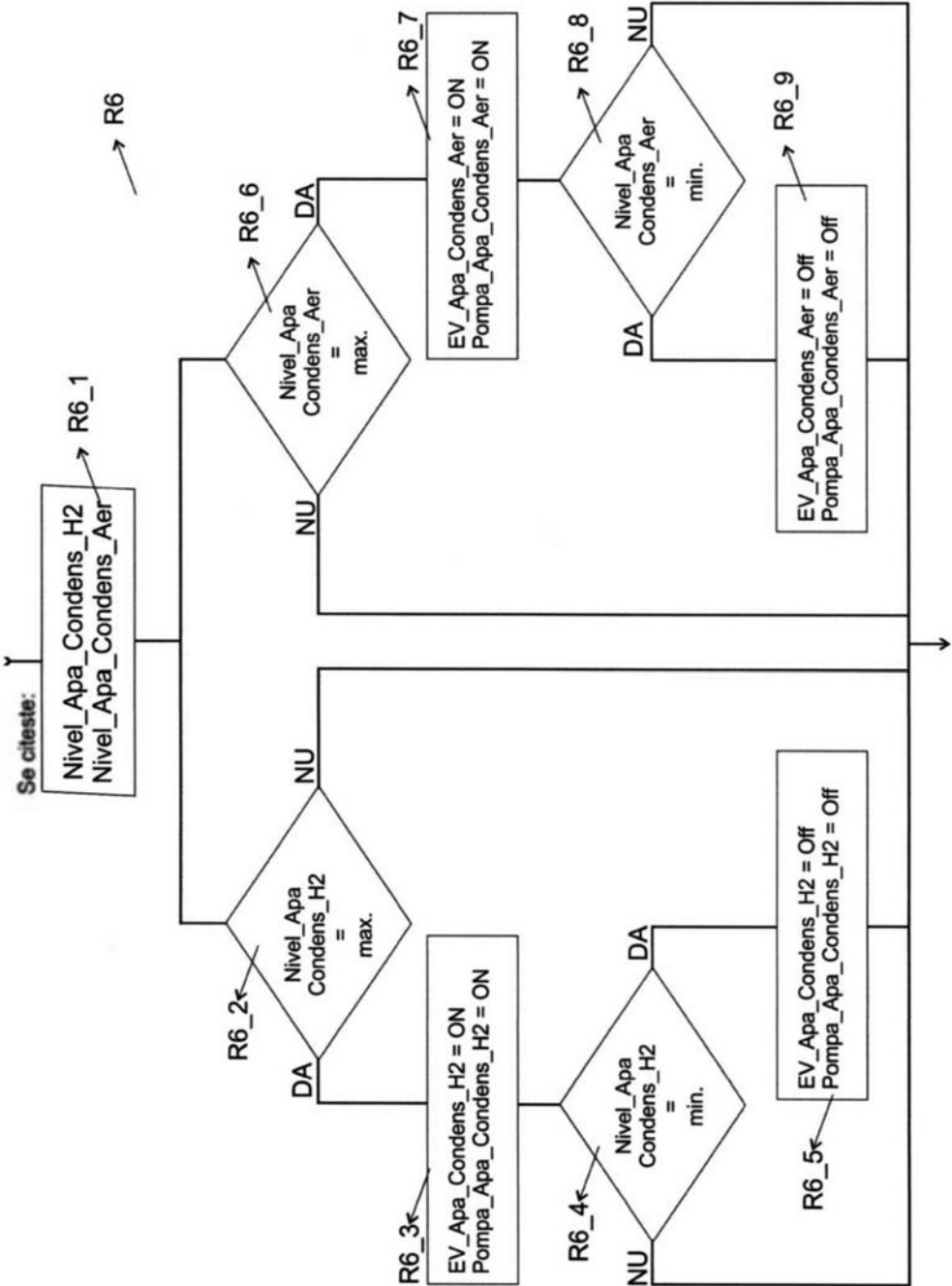


Fig. 8

(51) Int.Cl.

H01M 4/86 (2006.01),

H01M 8/24 (2006.01),

H01M 8/04 (2006.01)

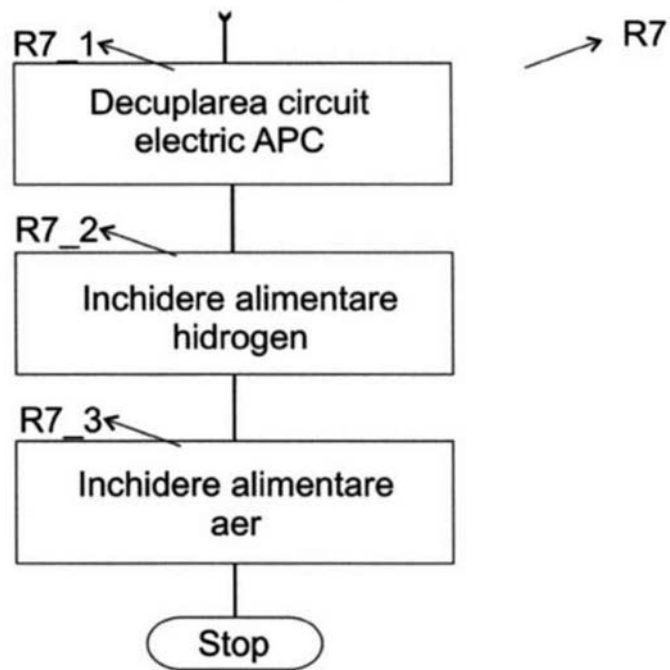


Fig. 9

(51) Int.Cl.

H01M 4/86 (2006.01);

H01M 8/24 (2006.01);

H01M 8/04 (2006.01)

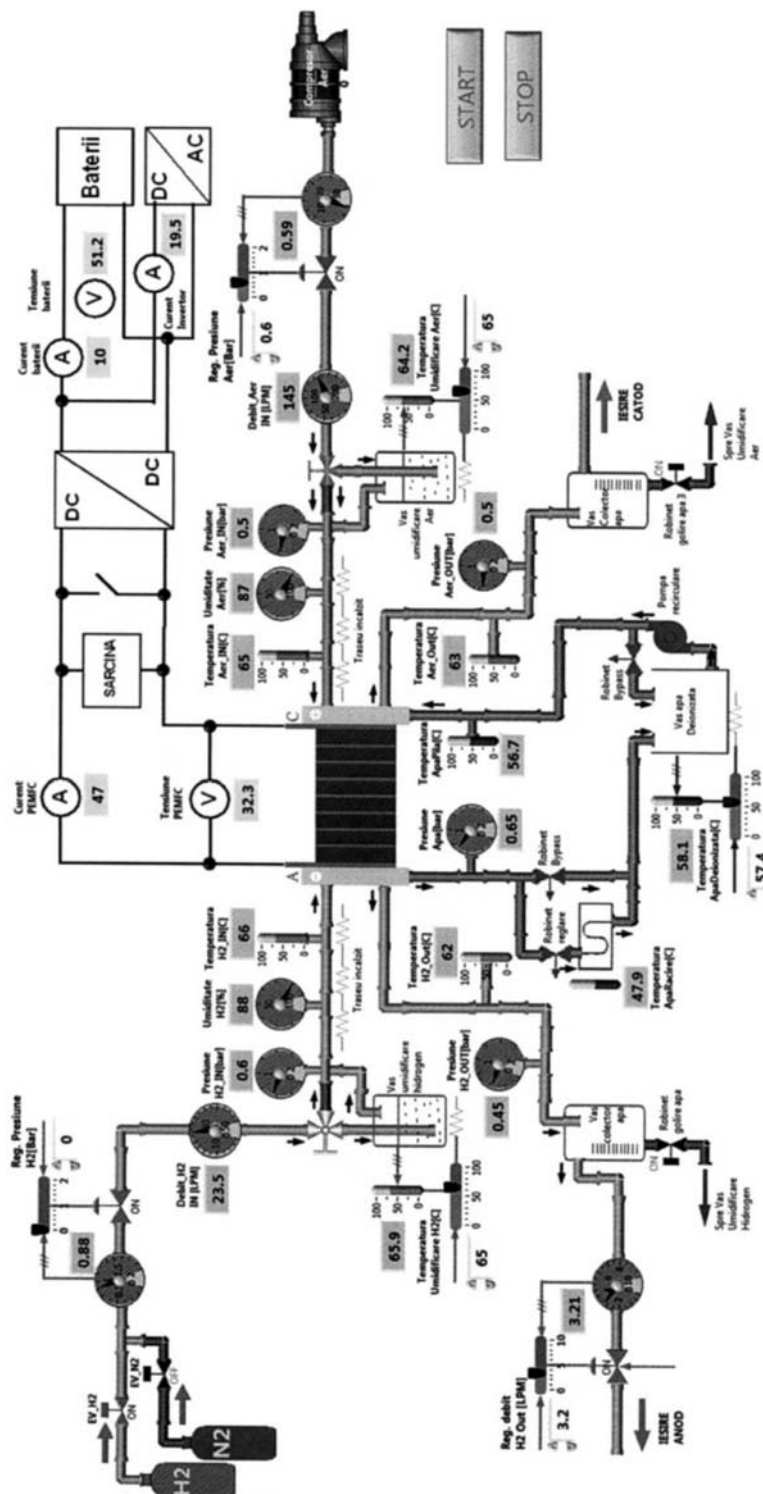


Fig. 10



Editare și tehnoredactare computerizată - OSIM
Tipărit la: Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci
sub comanda nr. 536/2019