

Titlul proiectului: **Sistem de conversie a energiei pentru un autobuz/microbuz electric pentru transport urban, cu stocare în supercondensatoare și acționare electrică cu densitate foarte mare de putere**

Acronim: **ECON-BUS**

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

Etapa 2022

Coordonator: **Academia Română - Filiala Timișoara**

Director proiect: **Prof.dr.ing. Nicolae MUNTEAN**

Partener 1: **Universitatea Politehnica Timișoara**

Responsabil P1: **Conf.dr.ing. Octavian CORNEA**

Perioada de derulare: **Ian. – Iul. 2022**

Cod proiect: **PN-III-P2-2.1-PED-2019-5230**

Echipa proiectului în etapa 2022

Coordonator: **Academia Română Filiala Timișoara**

Director proiect: **Prof.dr.ing. Nicolae MUNTEAN**

Membri:

Acad.prof.dr.ing. Ion BOLDEA

Prof.dr.ing. Lucian TUTELEA

Dr.ing. Ileana TORAC, CS2

Dr.ing. Sebastian MUNTEAN, CS1

Partener 1: **Universitatea Politehnica Timișoara**

Responsabil P1: **Conf.dr.ing. Octavian CORNEA**

Membri:

Prof.dr.ing. Gheorghe-Daniel ANDREESCU

Ș.L.dr.ing. Ana-Adela POPA

Asist.univ.dr.ing. Dan Cornel HULEA

Asist.univ.drd.ing. Liviu-Danut VITAN

Asist.univ.drd.ing. Adrian MARTIN

Drd.ing. Mihaita-Constantin GIREADĂ

Rezumat etapa 2022

Obiectivul major al proiectului este dezvoltarea unui model experimental demonstrativ de laborator, la scară redusă, pentru un sistem de conversie și stocare a energiei destinat unui vehicul electric de transport public (autobuz/microbuz), a cărui încărcare se realizează pe durata opririi în stații.

Sistemul este compus dintr-o acționare electrică cu densitate foarte mare de cuplu, alimentată de la un invertor cu densitate mare de putere asociate cu un mediu principal de stocare a energiei bazat pe celule de supercondensatoare și convertoare statice de curent continuu dedicate, conectate la o magistrală comună de curent continuu.

În perioada ianuarie – iulie 2022 a fost prevăzută Etapa 3 a proiectului: “Testare model experimental pe standul de laborator”, având următoarele activități:

Activități
3.1. Determinări experimentale 3.1.1 Testare extensivă pe standul de laborator și obținerea rezultatelor experimentale. Validare modele. (Co-ARFT) 3.1.2 Testare extensivă pe standul de laborator și obținerea rezultatelor experimentale. Validare modele. (P1-UPT)
3.2 Diseminare rezultate către mediul industrial 3.2.1 Elaborarea de materiale de promovare a rezultatelor proiectului, cu adresabilitatea către mediul industrial. Diseminare, inclusiv pe pagina web a proiectului

În scopul diseminării rezultatelor au fost trimise două articole la revista ISI cu factor de impact 4.079 IEEE Transactions on Industry Applications, publicația dedicată exclusiv aplicațiilor industriale care are, după cunoștința noastră, cea mai mare vizibilitate internațională. Un articol a fost deja publicat, celălalt este în curs de evaluare. În plus, a mai fost acceptat un articol la conferința IECON 2022, care va avea loc în luna octombrie anul curent. În luna iulie a fost organizat un workshop cu participanți din firmele multinaționale care activează în mediul industrial regional. Mai multe detalii despre diseminarea rezultatelor, precum și materialele prezentate în cadrul workshop-ului se găsesc pe pagina de internet a proiectului.

Descrierea rezultatelor experimentale obținute în această etapă este prezentată detaliat în capitolele următoare.

1 TESTAREA SUBSISTEMELOR COMPONENTE PE STANDUL EXPERIMENTAL

1.1 Rezultate Experimentale Subsistemul Component - Acționarea Electrică

În etapa anterioară au fost prezentate standul experimental și rezultate experimentale preliminare pentru subsistemul de acționare în care mașina electrică a fost testată atât în regim de motor cât și în regim de frână recuperativă utilizând metodologia de control propusă, fără regulatorul de viteză.

În această etapă au fost extinse încercările experimentale și s-a introdus regulatorul de viteză. În urma rezultatelor obținute, metodologia de control a fost adaptată pentru a răspunde cerințelor subsistemului. Regulatorul de viteză a fost implementat inițial ca un regulator de tip “supertwisting sliding mode” (1), dar a fost simplificat prin eliminarea funcției radical (2), care în regim stabilizat amplifică eroarea pentru valori ale acesteia subunitare. În mod normal, acest lucru reprezintă un avantaj, dar în acest caz, valoarea maximă a constantei proporționale (k_p) este limitată la o valoare scăzută, datorită faptului că, referințele de tensiune sunt prescrise în domeniul 0...1, iar valori mari ale constantei k_p cauzează instabilitate.

$$i_q^* = k_p \cdot \text{sign}(\varepsilon) \cdot \sqrt{|\varepsilon|} + \int k_i \cdot \text{sign}(\varepsilon) dt \quad (1)$$

$$i_q^* = k_p \cdot \varepsilon + \int k_i \cdot \text{sign}(\varepsilon) dt \quad (2)$$

Pentru a limita puterea absorbită/generată de către IPMSM (Mașină Sincronă cu Magneți Permanenți Interiori), o buclă de corecție a curentului din axa q a fost introdusă prin intermediul unui regulator de tip P care are ca mărime de intrare tensiunea din circuitul intermediar al inverterului.

Pentru a testa mașina de antrenare au fost efectuate mai multe încercări experimentale, atât în regim stabilizat cât și în regim tranzitoriu. Cu toate că a fost prezentată și detaliată în etapa precedentă schema de principiu a standului experimental aferent acționării electrice, se prezintă în Fig. 1 pentru a facilita vizualizarea configurației standului experimental. Sunt prezentate două seturi de rezultate experimentale pentru regimul stabilizat (Fig. 2- Fig. 7). În Fig. 2 - Fig. 4 referința de turație este turația de bază (2400 rpm) și mașina a fost încărcată la cuplul nominal 10Nm. Având în vedere că nu a fost depășită turația de bază, referința de curent în axa d (Fig. 3 – a)) are valoarea zero.

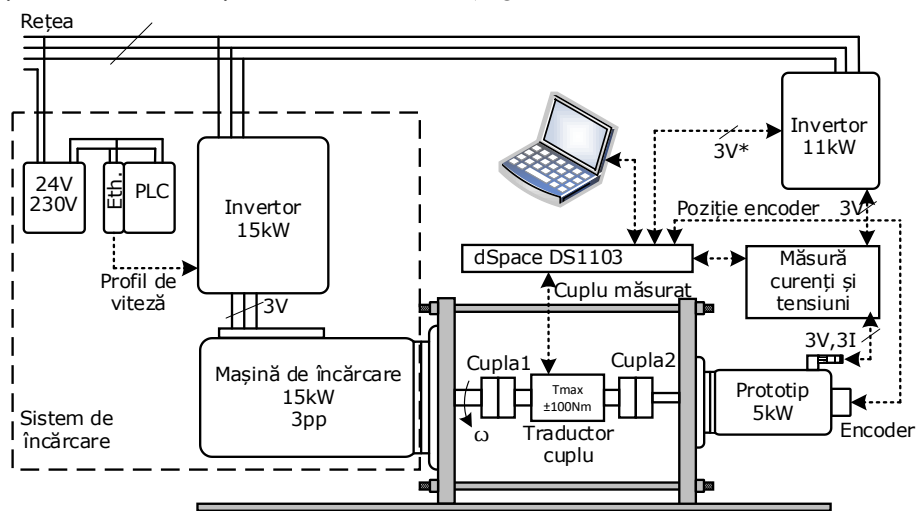


Fig. 1 Schema de principiu a standului experimental aferent acționării electrice

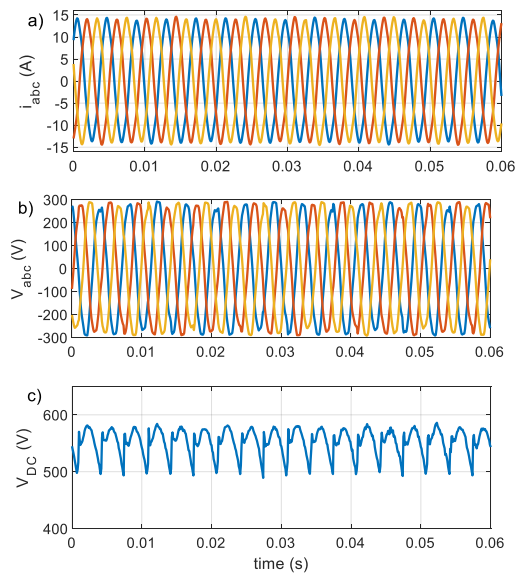


Fig. 2 Turația de bază (2400 rpm), cuplu nominal (20Nm) – a) Anvelopa curenților de fază, b) Anvelopa tensiunilor de fază, c) Tensiunea din DC-link

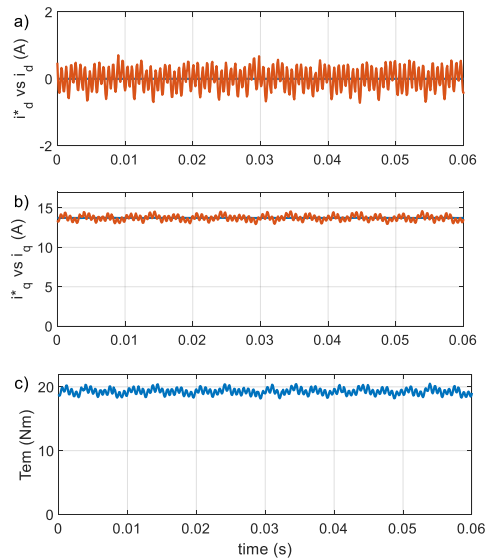


Fig. 3 Turația de bază (2400 rpm), cuplu nominal (20Nm) – a), b) Referințele de curent în axele dq versus curentul realizat, c) Cuplul electromagnetic dezvoltat de IPMSM

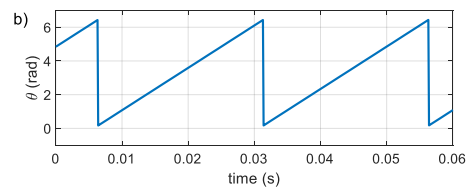
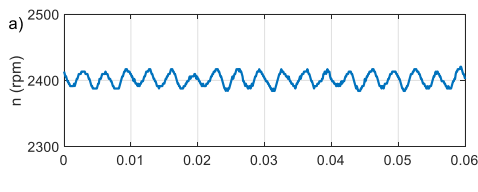


Fig. 4 Turația de bază (2400 rpm), cuplu nominal (20Nm) – a), b) Turația și poziția rotorului furnizate de traductorul de poziție incremental

Figurile Fig. 5 - Fig. 7 prezintă funcționarea IPMSM la turația maximă de 4800 rpm la care poate produce cuplul nominal de 10Nm.

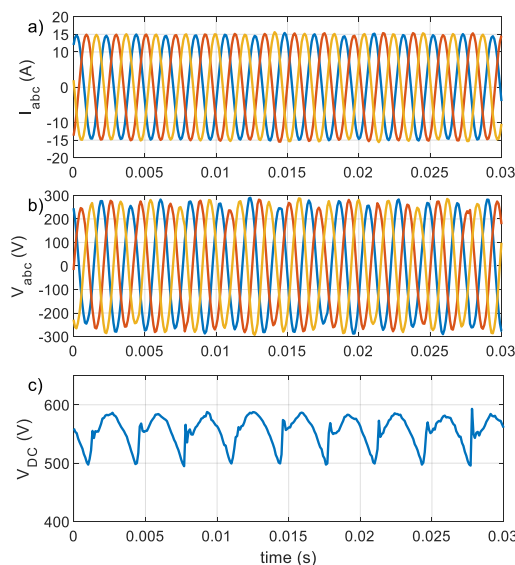


Fig. 5 Turația maximă (4800 rpm), cuplu nominal (10 Nm) – a) Anvelopa curenților de fază, b) Anvelopa tensiunilor de fază, c) Tensiunea din DC-link

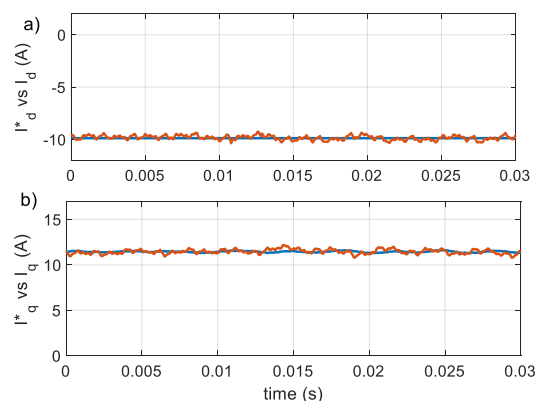


Fig. 6 Turația maximă (4800 rpm), cuplu nominal (10Nm) – a), b) Referințele de curent în axele dq versus curentul realizat

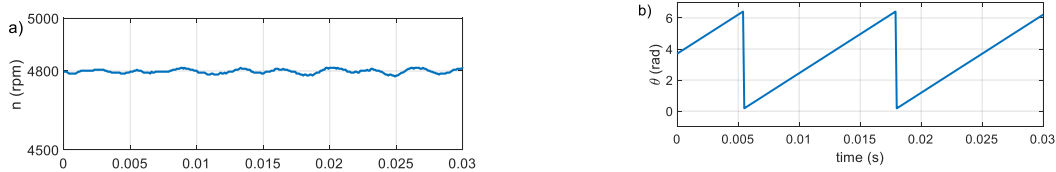


Fig. 7 Turația maximă (4800 rpm), cuplu nominal (10Nm) – a), b) Turația și poziția rotorului furnizate de traductorului de poziție incremental

În acest caz, se poate observa faptul că, referința de curent în axa d (Fig. 6 – a)) este negativă pentru a realiza slăbirea de câmp necesară depășirii turației de bază. În ambele cazuri anvelopa tensiunilor a fost determinată din referințele de tensiune raportate la tensiunea din circuitul intermediar.

Regimul tranzitoriu este prezentat în Fig. 8 - Fig. 10, pentru care a fost prescrisă o referință de viteză de rulare a microbuzului variabilă (Fig. 8) cu pornire și oprire de la 0 km/h. În acest caz, cuplul de încărcare a fost determinat pe baza modelului matematic a forței rezistente la înaintare (prezentat în etapa precedentă) și ecuația dinamică a mișcării. Modelul matematic a fost implementat pe un automat programabil (PLC). Cuplul de încărcare este prescris ca și referință inverterului aferent mașinii de încărcare utilizând rețeaua Ethernet. Întregul subsistem format din PLC, inverter și mașină de încărcare emulează traseul (cu parametrii configurabili) pe care rulează microbuzul.

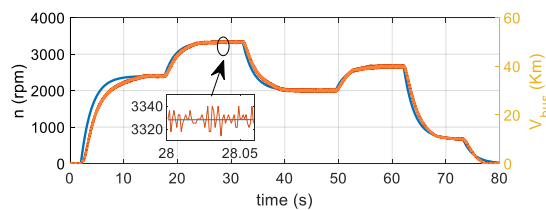


Fig. 8 Profil variabil de viteză – Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

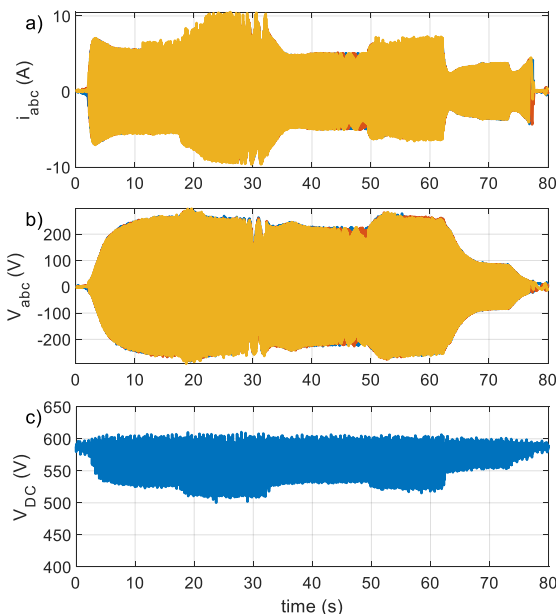


Fig. 9 Profil variabil de viteză – a) Anvelopa curenților de fază, b) Anvelopa tensiunilor de fază, c) Tensiunea din DC-link

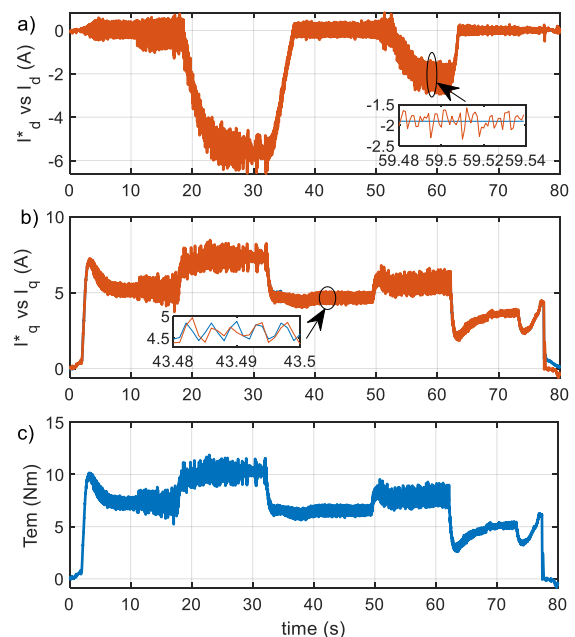


Fig. 10 Profil variabil de viteză - a), b) Referințele de curent în axele dq versus curentul realizat, c) Cuplul electromagnetic dezvoltat de IPMSM

1.2 Rezultate Experimentale Subsistemul Component – Conversie și Stocare a Energiei

Pentru a fi utilizat într-un sistem pentru încărcarea și descărcarea unei baterii de supercondensatoare (SC), convertorul bidirecțional hibrid cu condensatoare comutate (BHCC) necesită la nivelul de bază de control un regulator de curent și un regulator de tensiune.

1.2.1 Proiectarea regulatorului de curent al convertorului de încărcare

Proiectarea regulatorului de curent se poate realiza prin mai multe metode, iar în cazul de față s-a ales proiectarea bazată pe răspunsul în frecvență al modelului liniarizat al convertorului. Realizarea modelului liniarizat al BHCC a avut la bază schema echivalentă a acestuia ce conține rezistențele parazite din circuitul simplificat, circuit care utilizează o singură inductanță echivalentă pentru două inductanțe cuplate magnetic. Schema echivalentă a acestui circuit este prezentată în Fig. 11.

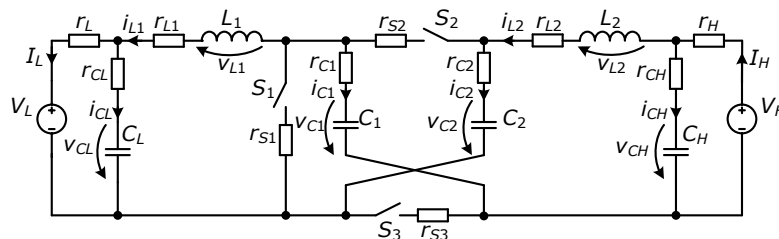


Fig. 11. Schema echivalentă a BHCC utilizată pentru realizarea modelului liniarizat

Pentru implementarea controlului trebuie determinate funcțiile de transfer care exprimă influența variației mici a factorului de umplere D asupra variațiilor mici ale curenților prin L_1 și L_2

$$G_{p1}(s) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{d}} = \frac{\tilde{i}_{L1}}{\tilde{d}}, \quad (3)$$

$$G_{p2}(s) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{d}} = \frac{\tilde{i}_{L2}}{\tilde{d}}. \quad (4)$$

Utilizând parametrii din Tabelul 1, cele două funcții de transfer sunt:

$$G_{p1}(s) = \frac{6.72 \cdot 10^6 \cdot s^4 + 5.65 \cdot 10^{13} \cdot s^3 + 1.19 \cdot 10^{20} \cdot s^2 + 1 \cdot 10^{22} \cdot s + 2.12 \cdot 10^{29}}{s^5 + 8.42 \cdot 10^6 \cdot s^4 + 1.77 \cdot 10^{13} \cdot s^3 + 1.16 \cdot 10^{17} \cdot s^2 + 3.07 \cdot 10^{22} \cdot s + 7.87 \cdot 10^{25}}, \quad (5)$$

$$G_{p2}(s) = \frac{2.62 \cdot 10^6 \cdot s^4 + 2.21 \cdot 10^{13} \cdot s^3 + 4.67 \cdot 10^{19} \cdot s^2 + 7.35 \cdot 10^{23} \cdot s + 7.05 \cdot 10^{28}}{s^5 + 8.42 \cdot 10^6 \cdot s^4 + 1.77 \cdot 10^{13} \cdot s^3 + 1.16 \cdot 10^{17} \cdot s^2 + 3.07 \cdot 10^{22} \cdot s + 7.87 \cdot 10^{25}}. \quad (6)$$

Tabelul 1. Parametrii BHCC utilizați în analiza dinamică

Element	Valoare	Unitate	Descriere
V_H	400	V	Tensiunea de alimentare a rețelei de tensiune ridicată
V_L	125	V	Tensiunea de alimentare a rețelei de tensiune joasă (pe supercondensator)
C_H	657	nF	Capacitatea condensatorului pe rețeaua de tensiune ridicată
C_L	4.5	μF	Capacitatea condensatorului pe rețeaua de tensiune joasă
C_1, C_2	8.4	μF	Capacitatea condensatoarelor comutate
L_1	38.9	μH	Inductanța inductorului de la intrarea de tensiune ridicată
L_2	99.8	μH	Inductanța inductorului de la intrarea de tensiune joasă
r_{S1}, r_{S2}, r_{S3}	41	mΩ	Rezistența de conducție a dispozitivelor semiconductoare
r_H	350	mΩ	Rezistența serie a traseului de alimentare V_H
r_L	50	mΩ	Rezistența serie a traseului de alimentare V_L
r_{CH}	9.4	mΩ	Rezistența serie echivalentă a condensatorului C_H

r_{CL}	3.1	m Ω	Rezistența serie echivalentă a condensatorului C_L
r_{C1}	3	m Ω	Rezistența serie echivalentă a condensatorului C_1
r_{L1}	4.5	m Ω	Rezistență serie a inductanței echivalente L_1
r_{L2}	10	m Ω	Rezistență serie a inductanței echivalente L_2
T	5	μ s	Perioada de comutație
f	200	kHz	Frecvența de comutație
D	0.487	-	Factorul de umplere corespunzător regimului staționar ales
I_{L1}	30	A	Valoarea de regim staționar a curentului prin inductorul L_1

Pentru a valida modelul calculat, răspunsul în frecvență al acestuia este reprezentat împreună cu răspunsul sistemului de comutație obținut din simulare în Fig. 12. Funcția de transfer care se controlează, $G_{p1}(s)$, este discretizată ($G_{p10}(z)$) și întârzieri adiționale datorate conversiei ADC și a modulatorului PWM sunt adăugate, obținând modelul real al sistemului controlat de microcontroler $G_{p1}(z)$. Răspunsul în frecvență al acestora este reprezentat în Fig. 13.

Pe baza răspunsului în frecvență al modelului $G_{p1}(z)$, este dimensionat regulatorul, pentru a obține un răspuns stabil cu o rezervă de fază de 63°, având următoarea funcție de transfer:

$$C(z) = \frac{1.9 \cdot 10^{-4} \cdot (z - 0.9912)}{(z - 1) \cdot (z - 0.8865)} \quad (7)$$

Răspunsul în frecvență al modelului convertorului împreună cu regulatorul, în buclă deschisă, este prezentat în Fig. 14, iar rezultate experimentale sunt prezentate în Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19.

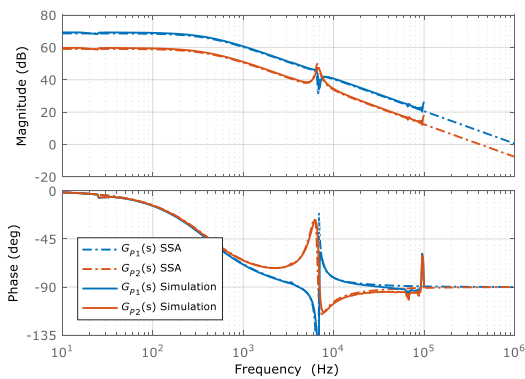


Fig. 12. Răspunsul în frecvență al BHCC pentru modelul matematic și cel de simulare

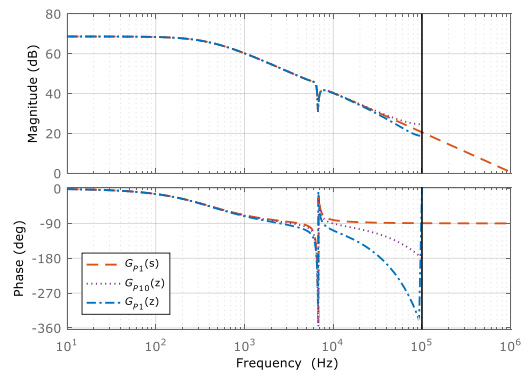


Fig. 13. Funcția de transfer care se controlează, $G_{p1}(s)$, discretizată ($G_{p10}(z)$) și modelul real al sistemului controlat de microcontroler $G_{p1}(z)$

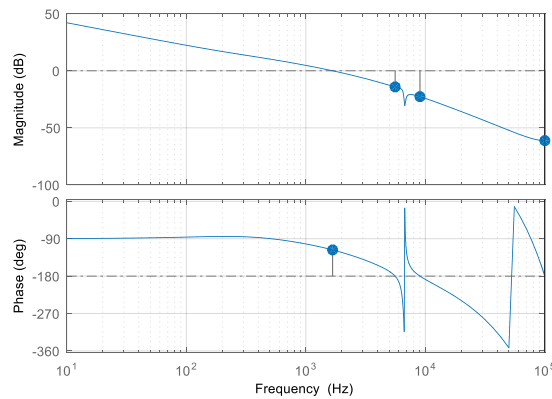


Fig. 14. Răspunsul în frecvență al BHCC cu regulator de curent, în buclă deschisă

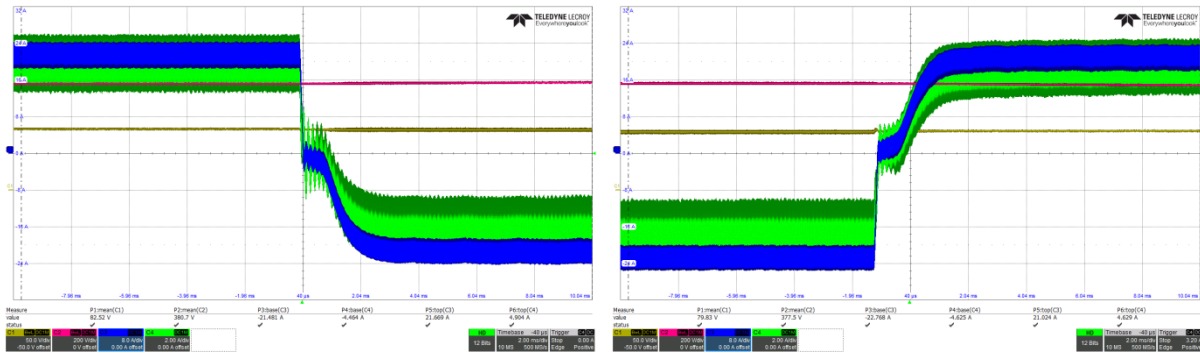


Fig. 15. Rezultate experimentale ale BHCC cu regulator de curent pentru referință de $\pm 20A$

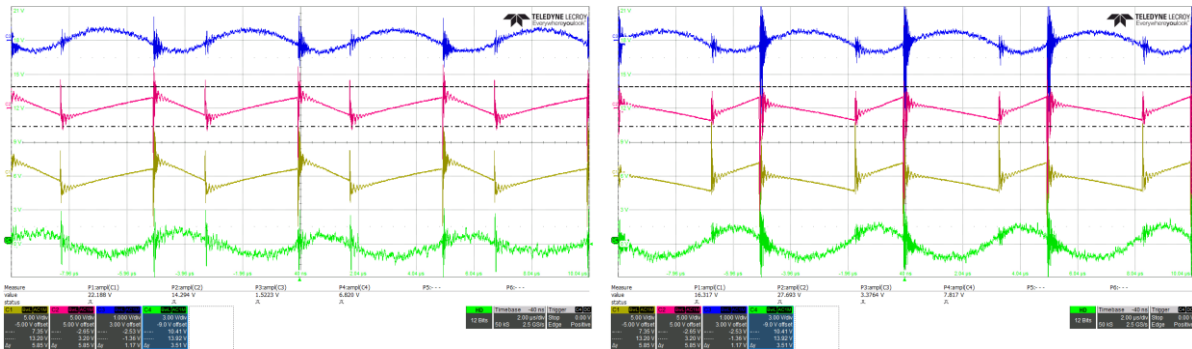


Fig. 16 Variația tensiunilor de pe intrări și a tensiunilor de pe capacitățile comutate (cuplaj AC)

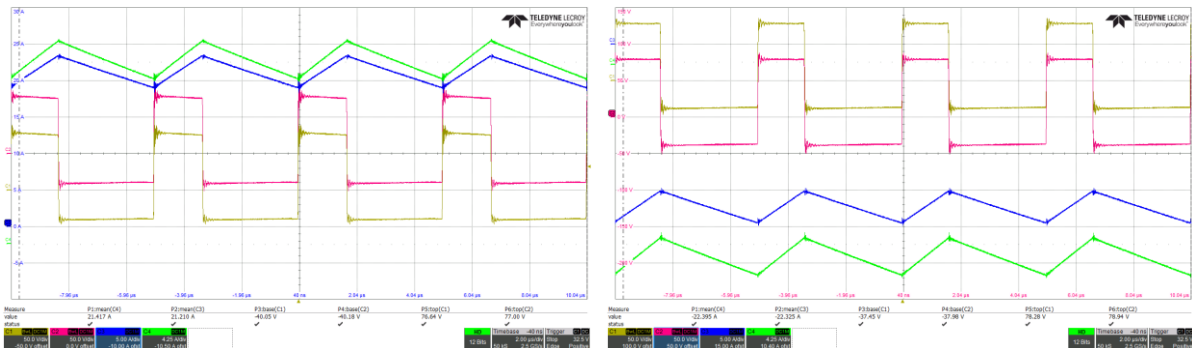


Fig. 17 Tensiunile și curenții de pe bobina cuplată plasată pe VL (stânga – buck, dreapta – boost)

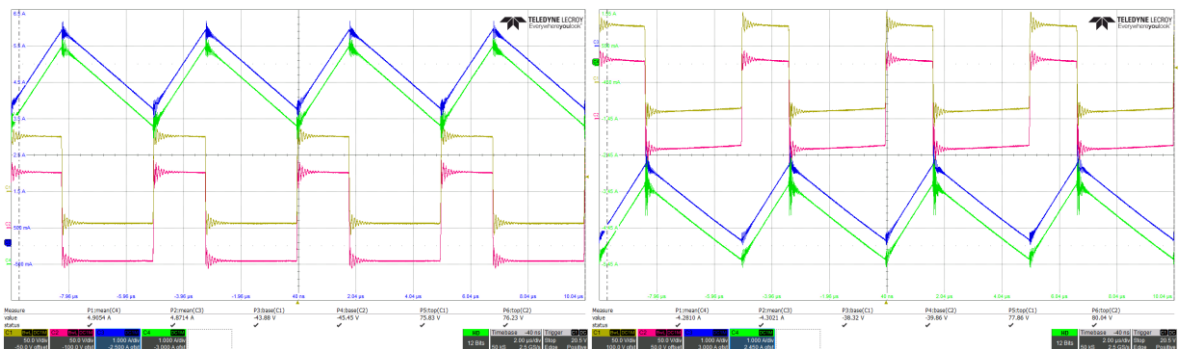


Fig. 18 Tensiunile și curenții de pe bobina cuplată plasată pe VH (stânga – buck, dreapta – boost)

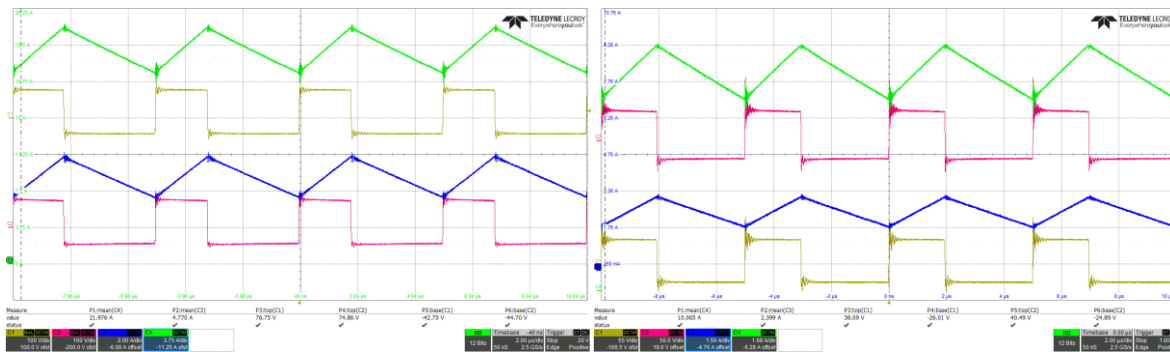


Fig. 19 Tensiunile și curenții de pe bobinele plasate pe VH și VL (stânga – buck, dreapta – boost)

1.2.2 Proiectarea regulatorului de tensiune al convertorului de încărcare

Pentru a fi utilizat împreună cu sistemul de acționare, convertorul trebuie să mențină tensiunea constantă pe magistrala de tensiune ridicată, astfel, pe lângă regulatorul de curent, acesta are nevoie și de un regulator de tensiune, în cascadă cu cel de curent. Pentru acordarea regulatorului de tensiune s-a realizat simularea BHCC (Fig. 20) împreună cu sistemul de control (Fig. 21), și s-au acordat parametrii regulatorului de tensiune astfel încât mărimea controlată este stabilă, fără eroare de regim staționar, și cu suprareglaj redus, obținând rezultatele din Fig. 22.

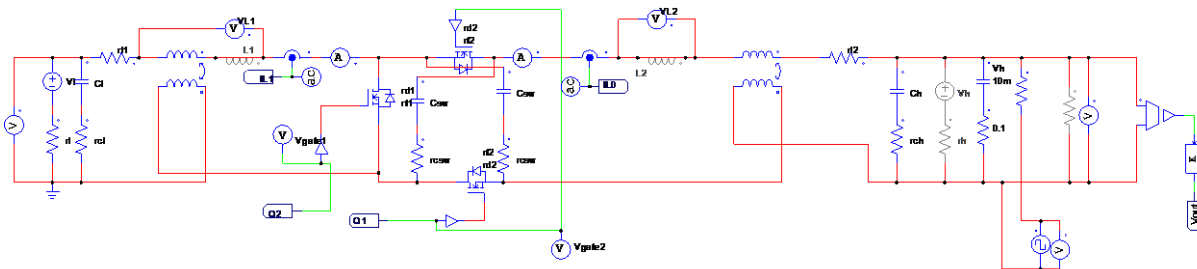


Fig. 20. Schema de simulare a convertorului

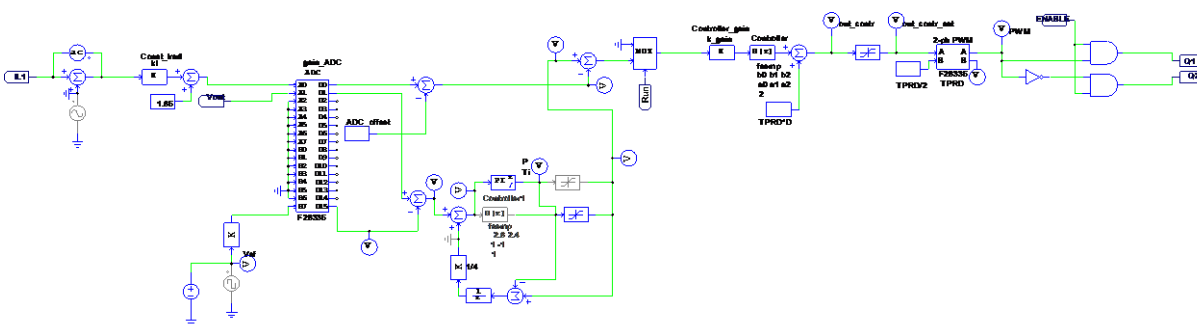


Fig. 21. Schema de simulare a structurii de control, utilizând modelul microcontrolerului



Fig. 22. Rezultate de simulare ale acordării regulatorului de tensiune (VHstep – perturbația sarcinii, VH – tensiunea controlată, IL1 – curentul controlat, I_Reg_sat – ieșirea regulatorului de tensiune, out_confr_sat – ieșirea regulatorului de curent)

2 REZULTATE EXPERIMENTALE – SISTEM DE CONVERSIE A ENERGIEI PENTRU UN AUTOBUZ/MICROBUZ ELECTRIC PENTRU TRANSPORT URBAN

Realizarea obiectivului propus în proiect, presupune integrarea celor două subsisteme componente principale (subsistemul de acționare electrică cu densitate mare de putere și subsistemul de stocare a energiei în celule de supercondensatoare), la nivel de model experimental demonstrativ de laborator, pe o magistrală comună de curent continuu prin care se realizează transferul bidirecțional de putere.

În primele două subcapitole ale prezentului raport s-au prezentat rezultatele obținute pentru cele două subsisteme în regim de funcționare independent. Dezvoltarea separată a celor două subsisteme a fost realizată pentru ca fiecare dintre ele să răspundă cerințelor impuse în termeni de putere, curent, tensiune, cu protecțiile aferente, astfel încât ansamblul să nu fie afectate de apariția unui posibil defect la oricare dintre ele.

În Fig. 23 este prezentată schema standului experimental realizat pentru a testa sistemul de conversie a energiei pentru un autobuz/microbuz electric pentru transport urban care integrează cele două subsisteme prezentate anterior. Magistrala care asigură conexiunea celor două subsisteme este DC Link, pentru care s-a ales din motive de protecție nivelul de tensiune de 375V. Convertorul bidirecțional menține nivelul tensiunii pe magistrală, prin utilizarea energiei din bateria de supercondensatoare în regim de motor, respectiv încărcarea bateriei de supercondensatoare în regim de frână recuperativă a IPMSM. De asemenea, metodologia de control a IPMSM limitează puterea vehiculată între DC Link și IPMSM în funcție de valoarea tensiunii din DC Link. Dacă valoarea tensiunii are o tendință crescătoare, ceea ce înseamnă că bateria de supercondensatoare este încărcată, se va reduce curentul prescris în axa q astfel încât frânarea recuperativă să fie redusă. În cazul în care valoarea tensiunii are o tendință descrescătoare, ceea ce înseamnă că bateria de supercondensatoare este descărcată, se va limita puterea absorbită de către IPMSM. Acest lucru se transpune în realitate prin faptul că microbuzul va avea accelerația și viteza de deplasare limitate pentru a ajunge în stația următoare. Limita de tensiune pentru bucla de corecție a curentului în axa q a fost setată la 380V. De asemenea s-au introdus protecții pentru limita de tensiune de 400V, peste care se oprește controlul IPMSM. Regimul de încărcare a bateriei de supercondensatoare de la stația de încărcare a fost testat prin utilizarea unei surse de curent continuu conectată pe magistrala comună (DC source în Fig. 23). Transmisia a fost emulată utilizând o mașină de inducție (IM) cuplată direct la arborele mașinii de antrenare (IPMSM). Aceasta este condusă cu un inverter bidirecțional care primește referința de cuplu

de încărcare de la un PLC în care este implementat modelul matematic aferent. Aceasta a fost prezentată în detaliu în raportul etapei 2021.

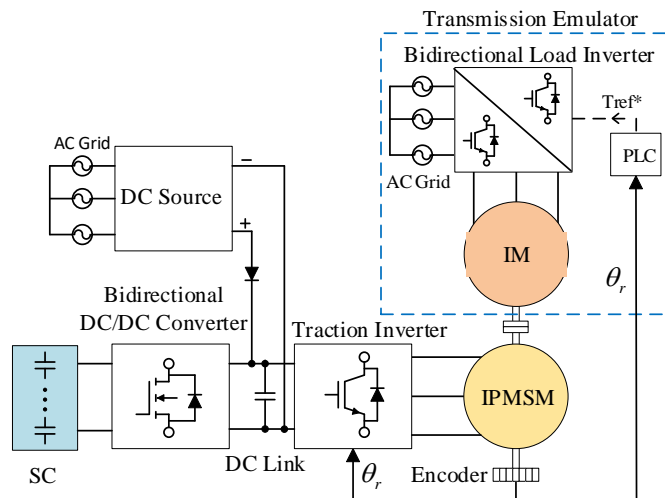


Fig. 23 Schema de principiu stand experimental sistem de conversie a energiei pentru autobuz/microbuz electric pentru transport urban

Au fost efectuate încercări experimentale extinse pentru a verifica funcționalitatea și răspunsul sistemului pentru diferite condiții de exploatare. Sunt descrise 9 experimente care au fost efectuate, atât pentru regim stabilizat de funcționare cât și pentru regim tranzitoriu, dar nu pentru toate sunt prezentate și rezultate experimentale în acest raport, din cauza restricției de încadrare într-un număr relativ redus de pagini. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 25 - Fig. 70. Achiziția mărimilor de interes a fost efectuată în cazul acționării electrice direct de pe sistemul dSpace (s-au măsurat pentru metodologia de control curenții de pe faze, poziția furnizată de traductorul de poziție incremental și tensiunea din DC Link, restul mărimilor prezentate au fost determinate pe baza măsurărilor efectuate) iar în cazul subsistemului de conversie s-a utilizat un osciloscop cu sonde de tensiune și curenți.

Experimentul 1

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului la viteză și cuplu de încărcare constante și regim de motor pentru mașina de antrenare, pentru care s-a impus un necesar de putere vehiculată din bateria de condensatoare spre circuitul DC Link de 1 kW. Valoarea cuplului de încărcare constant a fost prescrisă ca și referință pentru inverterul de încărcare din PLC. Având în vedere faptul că viteza de deplasare este mai mică decât viteza de bază a mașinii de antrenare, referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare de referință pozitivă, aferentă regimului de motor, și este obținută la ieșirea regulatorului de viteză. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 24- Fig. 28.

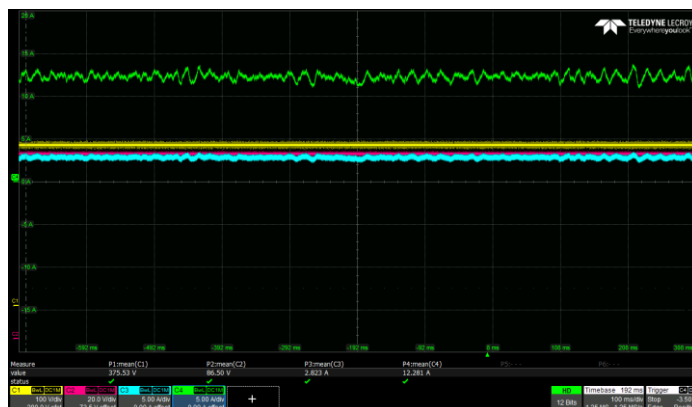


Fig. 24 Forme de unda sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH – albastru- curentul prin inductivitatea conectată la VH, Ch4:IL – verde- curentul prin inductivitatea conectată la VL)

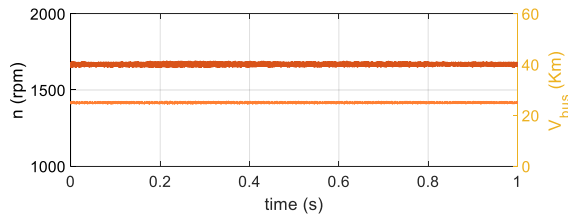


Fig. 25 Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

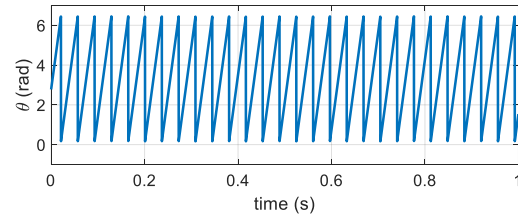


Fig. 26 Poziția rotorului furnizată de traductorul de poziție incremental

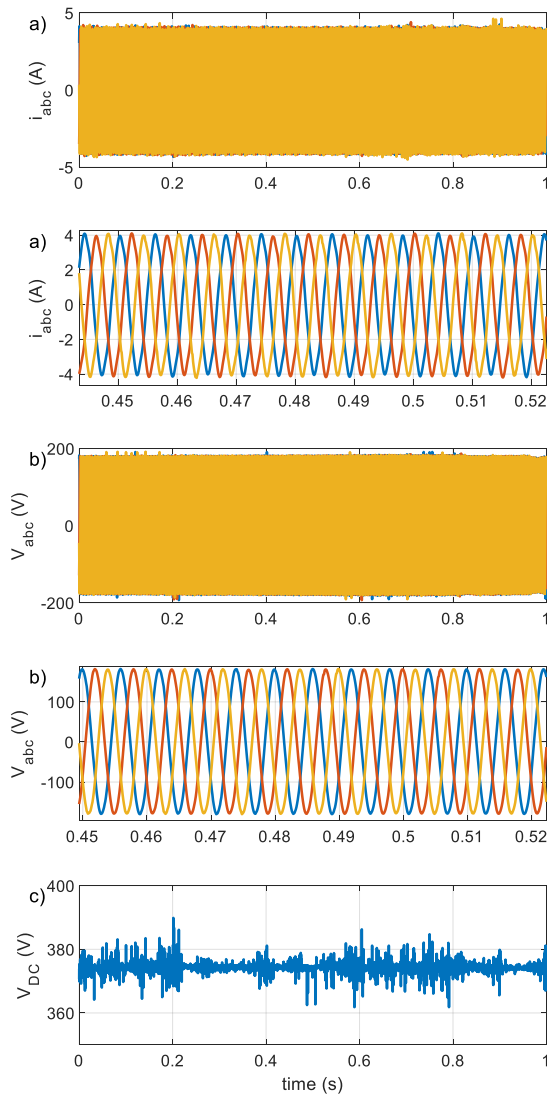


Fig. 27 a) Anvelopa curenților de fază, b) Anvelopa tensiunilor de fază + zoom în, c) Tensiunea din DC-link

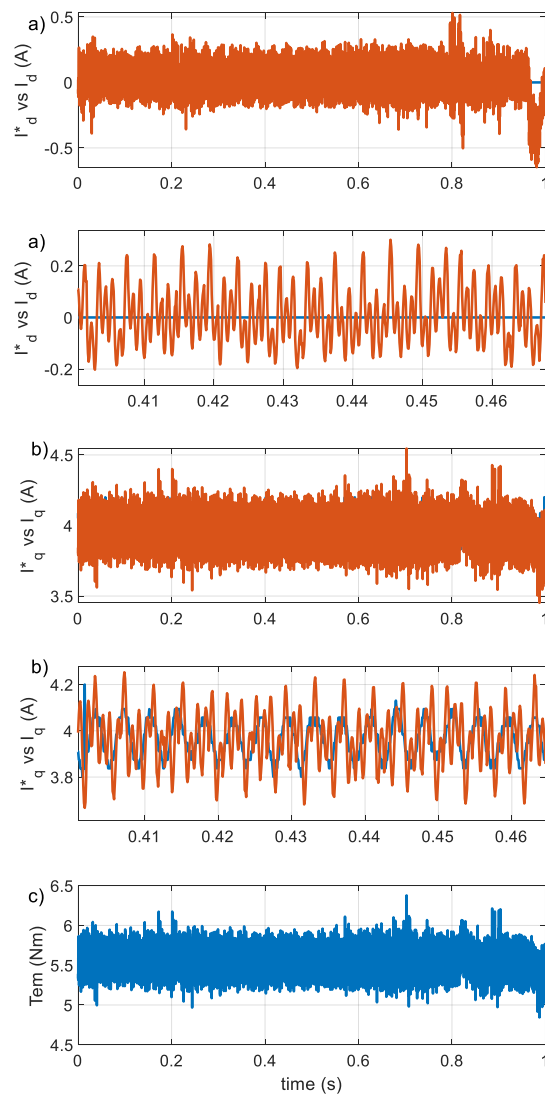


Fig. 28 a), b) Referințele de curent în axele dq versus curentul realizat + zoom în, c) Cuplul electromagnetic dezvoltat de IPMSM

Experimentul 2

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului la viteză și cuplu de încărcare constant și regim de generator pentru mașina de antrenare, pentru care s-a impus un necesar de putere

vehiculată din circuitul DC Link spre bateria de supercondensatoare de 1 kW. Acest regim se transpune în realitate prin faptul că microbuzul coboară o pantă cu un anumit grad de înclinație (care asigură suficient cuplu pozitiv pentru IPMSM pentru a produce puterea vehiculată + pierderile datorate randamentului de conversie), iar pentru a menține viteza constantă, IPMSM este în regim de frână recuperativă. Valoarea cuplului de încărcare constant a fost prescrisă ca și referință pentru inverterul de încărcare din PLC. Având în vedere faptul că viteza de deplasare este mai mică decât viteza de bază a mașinii de antrenare, referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare de referință negativă, aferentă regimului de generator. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 29- Fig. 35.

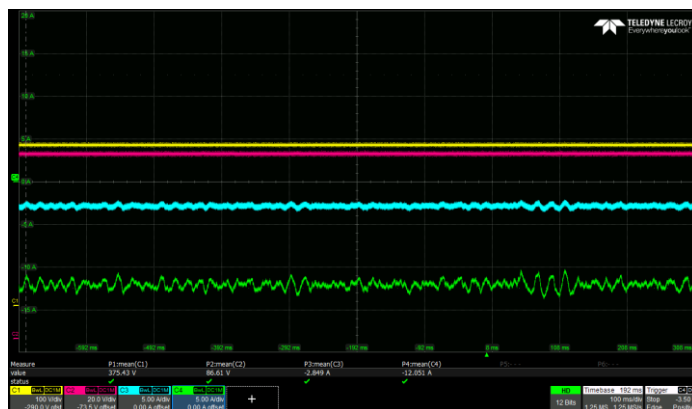


Fig. 29 Forme de unda sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH, Ch4:IL)

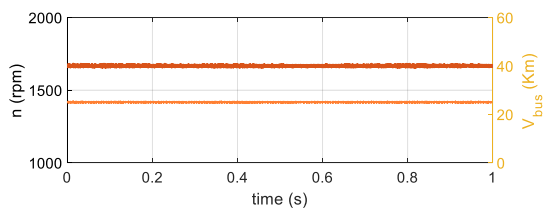


Fig. 30 Referința versus valoarea realizată a turajției unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

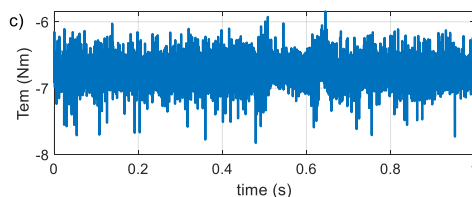


Fig. 31 Cuplul electromagnetic al IPMSM (negativ-regim de generator)

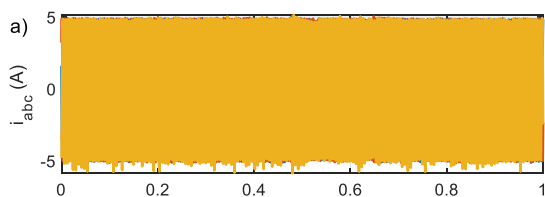


Fig. 32 Anvelopa curenților de fază

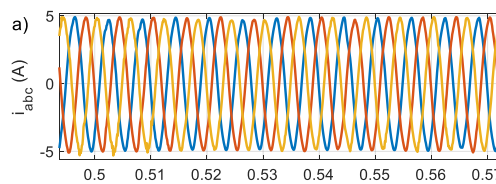


Fig. 33 Curenții de fază

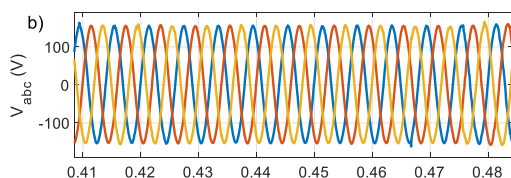


Fig. 34 Tensiunile de fază

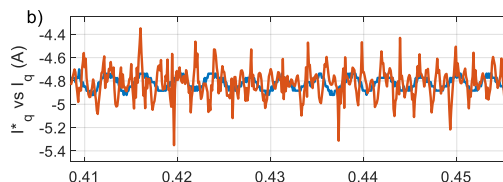


Fig. 35 Referința de curent (albastru) și curentul în axa q (detaliu)

Experimentul 3

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului la viteză și cuplu de încărcare constant și regim de generator pentru mașina de antrenare, pentru care s-a impus un necesar de putere vehiculată

din circuitul DC Link spre bateria de supercondensatoare de 2 kW. Este similar experimentului 2, diferă doar nivelul de putere. În Fig. 36 sunt prezentate datele experimentale care evidențiază creșterea valorii curentului în axa q și a cuplului în regim de generator față de experimentul 2.

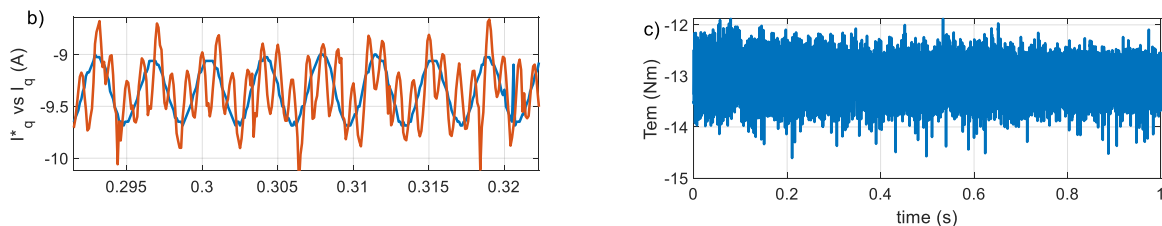


Fig. 36 Referința de curent și curentul în axa q (stânga) și cuplul electromagnetic dezvoltat de IPMSM (dreapta)

Experimentul 4

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului la referință de viteză constantă, variația treaptă crescătoare a cuplului de încărcare și regim de motor pentru mașina de antrenare, pentru care s-a impus o variație a necesarului de putere vehiculată din bateria de condensatoare spre circuitul DC Link de la 1 kW la 2 kW. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 37- Fig. 41.

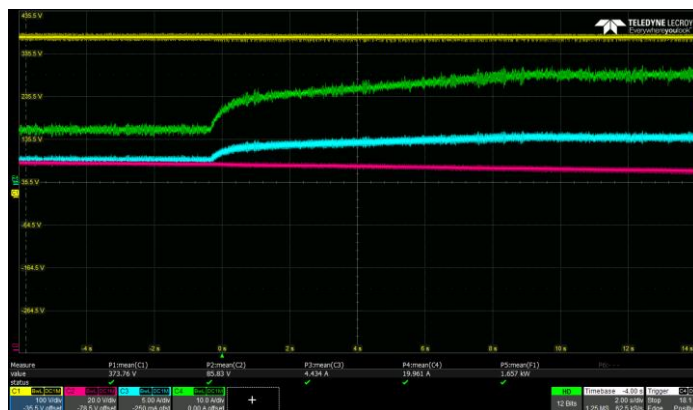


Fig. 37 Forme de unda sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH, Ch4:IL)

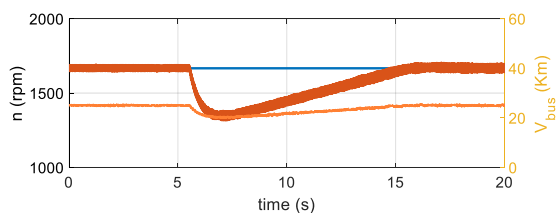


Fig. 38 Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

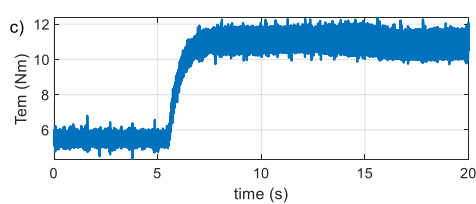


Fig. 39 Cuplul electromagnetic al IPMSM

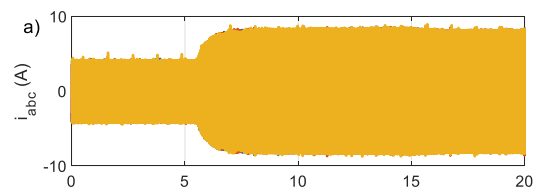


Fig. 40 Anvelopa curenților de fază

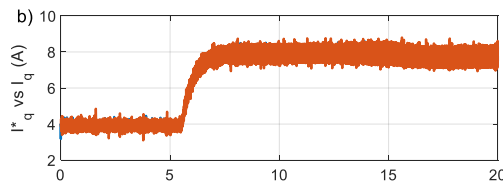


Fig. 41 Referința de curent și curentul în axa q

Variația cuplului de încărcare a fost prescrisă ca și referință pentru inverterul de încărcare din PLC. Având în vedere faptul că viteza de deplasare este mai mică decât viteza de bază a mașinii de antrenare, referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare de referință pozitivă aferentă regimului de motor. Acest regim se transpune în realitate prin trecerea microbuzului

de pe o zonă a traseului cu o pantă a cărei grad de înclinație este zero la o zonă cu o pantă cu un grad de înclinație care necesită o suplimentare semnificativă a puterii.

Experimentul 5

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului la referință de viteză constantă, variația treaptă descrescătoare a cuplului de încărcare și regim de motor pentru mașina de antrenare, pentru care s-a impus o variație a necesarului de putere vehiculată din bateria de condensatoare spre circuitul DC Link de la 2 kW la 1 kW. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 42 - Fig. 46.

Variația cuplului de încărcare a fost prescrisă ca și referință pentru inverterul de încărcare din PLC. Având în vedere faptul că viteza de deplasare este mai mică decât viteza de bază a mașinii de antrenare, referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare de referință pozitivă aferentă regimului de motor. Acest regim se transpune în realitate prin trecerea microbuzului de pe o zonă a traseului cu o pantă a cărei grad de înclinație necesită o putere vehiculată de 2 kW la o zonă o pantă cu un grad de înclinație redus, astfel încât să rezulte un necesar de reducere a puterii vehiculate de 1kW.

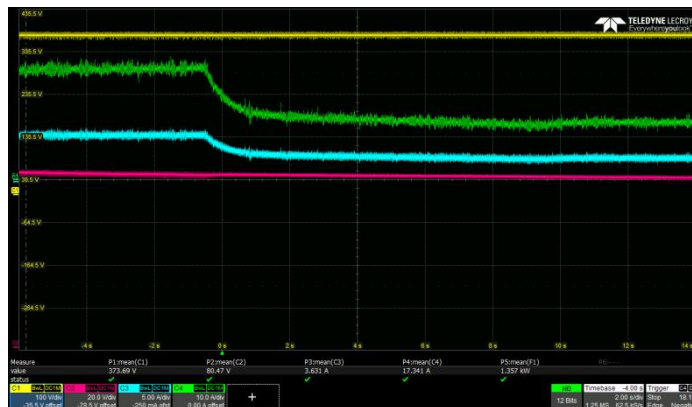


Fig. 42 Forme de unda sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH, Ch4:IL)

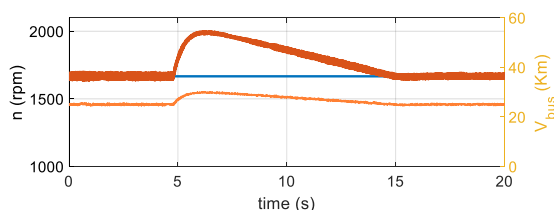


Fig. 43 Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

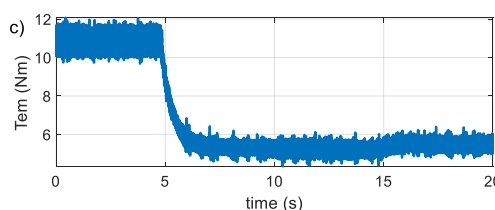


Fig. 44 Cuplul electromagnetic al IPMSM

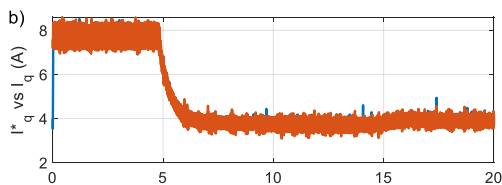


Fig. 45 Referința de curent și curentul în axa q

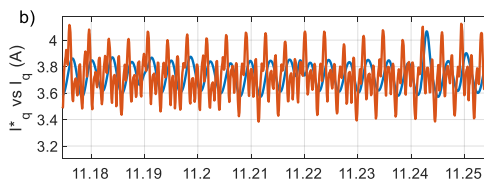


Fig. 46 Referința de curent și curentul în axa q (detaliu)

Experimentul 6

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului la referință de viteză constantă, variația treaptă descrescătoare a cuplului de încărcare pentru care mașina de antrenare trece din regim

de motor în regim de generator, pentru care s-a impus o variație a necesarului de putere vehiculată între bateria de condensatoare și circuitul DC Link de la 1 kW la -1 kW. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 47 - Fig. 51.

Variația cuplului de încărcare a fost prescrisă ca și referință pentru inverterul de încărcare din PLC. Referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare de referință pozitivă aferentă regimului de motor în prima parte și referință negativă aferentă regimului de generator în a doua parte, referință rezultată din ieșirea regulatorului de viteză. Acest regim se transpune în realitate prin deplasarea microbuzului de pe un traseu cu o pantă a cărui grad de înclinație este zero, pentru care se vehiculează o putere cu valoarea de 1 kW dinspre bateria de supercondensatoare spre DC Link, la deplasarea pe o pantă cu un grad de înclinație necesar (microbuzul coboară panta) astfel încât pentru a menține viteza constantă, IPMSM generează o putere de 1kW plus pierderile aferente randamentului de conversie.

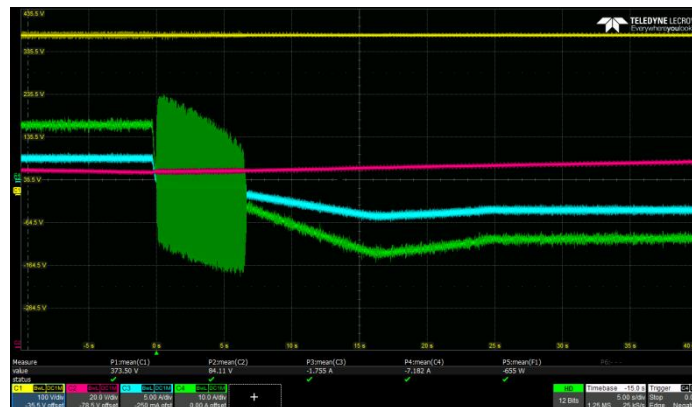


Fig. 47 Forme de undă sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH, Ch4:IL)

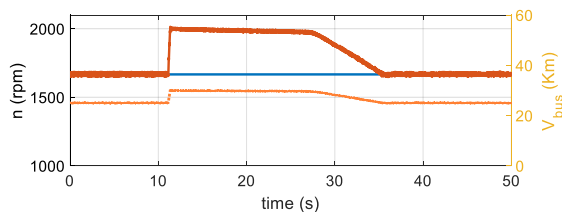


Fig. 48 Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

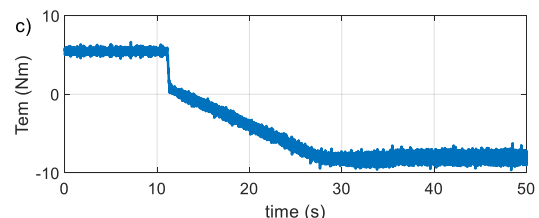


Fig. 49 Cuplul electromagnetic al IPMSM

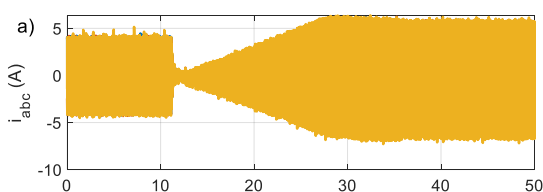


Fig. 50 Anvelopa curentilor de fază

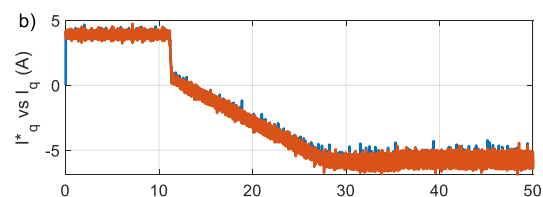


Fig. 51 Referința de curent și curentul în axa q

Experimentul 7

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului pentru o referință de profil de viteză variabil și cuplului de încărcare constant. Cuplul de încărcare constant a fost prescris ca și referință pentru inverterul de încărcare, din PLC. Referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare de referință pozitivă aferentă regimului de motor care variază astfel încât să asigure necesarul de cuplu suplimentar pentru a realiza referința de viteză. Acest regim se transpune în realitate prin deplasarea microbuzului de pe un traseu cu o pantă a cărei grad de înclinație este zero, cu variația vitezei de deplasare. În acest regim puterea este vehiculată dinspre bateria de

supercondensatoare spre DC Link pentru perioada regimului de accelerare și deplasare la viteză constantă și în sens invers pe perioada regimului frânare. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 52 - Fig. 56.

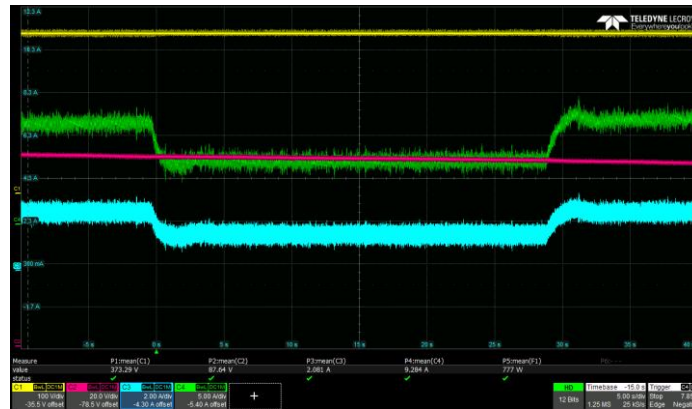


Fig. 52 Forme de unda sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH, Ch4:IL)

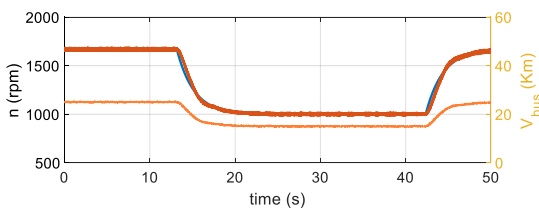


Fig. 53 Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

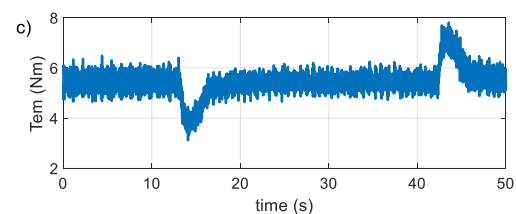


Fig. 54 Cuplul electromagnetic al IPMSM

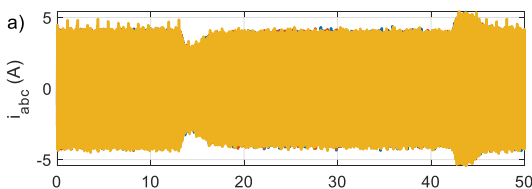


Fig. 55 Anvelopa curentilor de fază

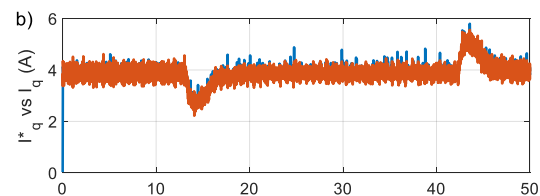


Fig. 56 Referința de curent și curentul în axa q

Experimentul 8

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului pentru o referință de profil de viteză variabil în mai multe trepte la cuplul de încărcare constant. Cuplul de încărcare constant a fost prescris ca și referință pentru inverterul de încărcare, din PLC. Referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare pozitivă aferentă regimului de motor, care variază astfel încât să asigure necesarul de cuplu suplimentar pentru a realiza profilul de viteză impus. Acest regim se transpune în realitate prin deplasarea microbuzului de pe un traseu cu o pantă a cărei grad de înclinație este zero, cu variația vitezei de deplasare. În acest regim puterea este vehiculată dinspre bateria de supercondensatoare spre DC Link pentru perioada regimului de accelerare și deplasare la viteză constantă și în sens invers pe perioada regimului frânare. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 57 - Fig. 63.

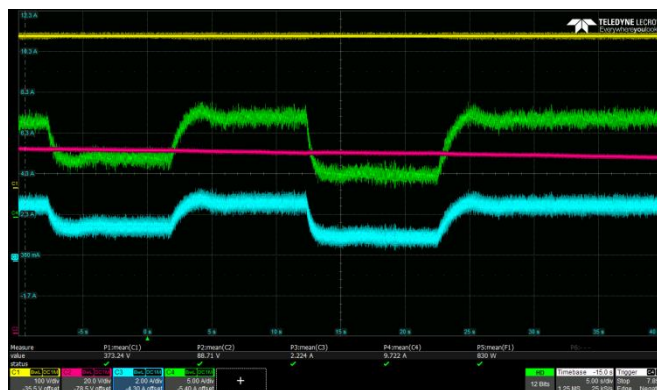


Fig. 57 Forme de unda sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH, Ch4:IL)

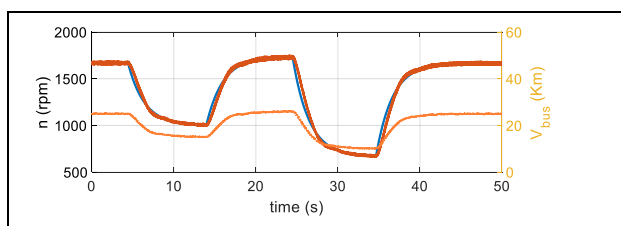


Fig. 58 Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

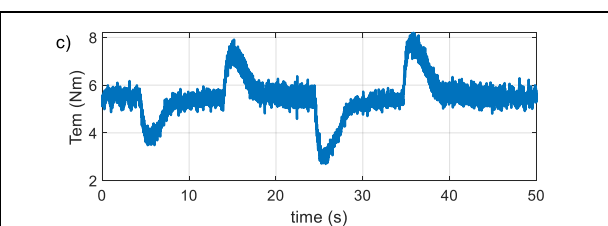


Fig. 59 Cuplul electromagnetic al IPMSM

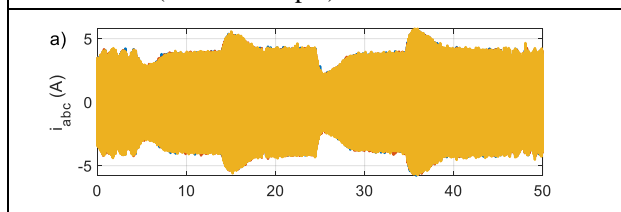


Fig. 60 Anvelopa curenților de fază

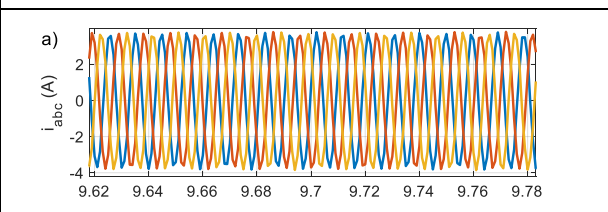


Fig. 61 Curenții de fază (detaliu)

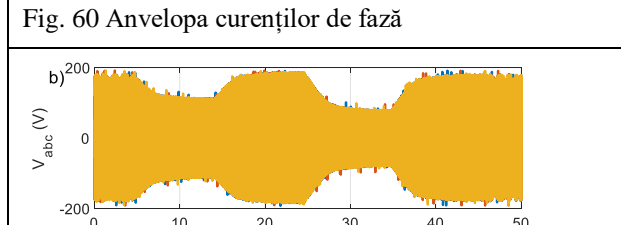


Fig. 62 Anvelopa tensiunilor de fază

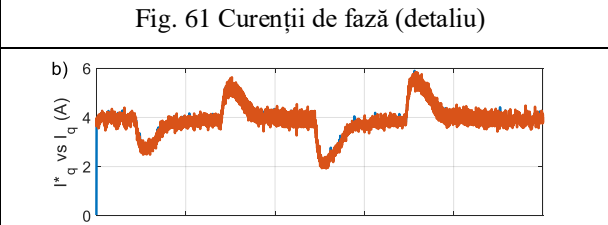


Fig. 63 Referința de curent (albastru) și curentul realizat în axa q

Experimentul 9

S-a testat sistemul în regim de deplasare a microbuzului pentru o referință de profil de viteză variabil în mai multe trepte și la cuplul de încărcare variabil. Cuplul de încărcare variabil a fost determinat pe baza modelului matematic aferent forței rezistente la înaintare și ecuației dinamice a mișcării. A fost prescris ca și referință pentru inverterul de încărcare, din PLC. Având în vedere faptul că viteza de deplasare este mai mică decât viteza de bază a mașinii de antrenare, referința de curent în axa d este zero. Referința de curent în axa q are o valoare pozitivă aferentă regimului de motor, care variază astfel încât să asigure necesarul de cuplu suplimentar pentru a realiza profilul de viteză impus. Acest regim se transpune în realitate prin deplasarea microbuzului de pe un traseu cu o pantă a cărei grad de înclinație este zero, cu variația vitezei de deplasare. În acest regim puterea este vehiculată dinspre bateria de supercondensatoare spre DC Link pentru perioada regimului de accelerare și deplasare la viteză constantă și în sens invers pe perioada regimului frânăre. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 64 - Fig. 70.

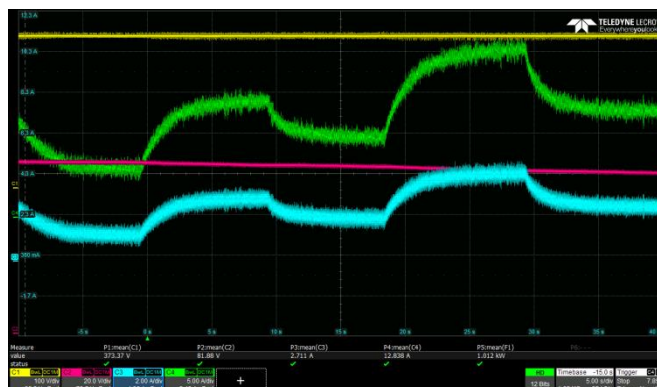


Fig. 64 Forme de unda sistem de Conversie și Stocare (Ch1:VH, Ch2:VL, Ch3:IH, Ch4:IL)

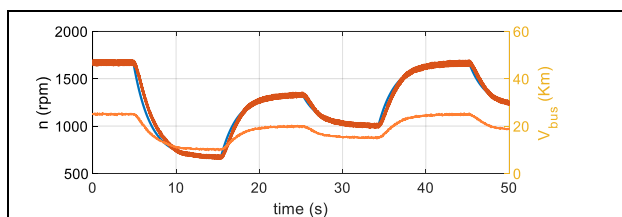


Fig. 65 Referința versus valoarea realizată a turației unghiulare a rotorului (axa din stânga), viteza autobuzului (axa din dreapta)

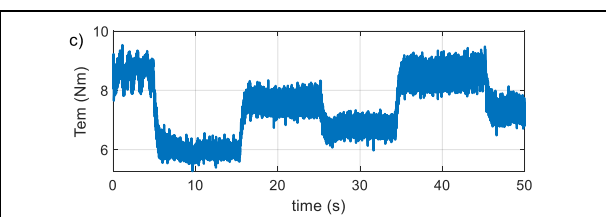


Fig. 66 Cuplul electromagnetic al IPMSM

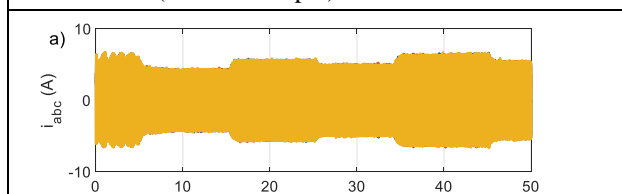


Fig. 67 Anvelopa curenților de fază

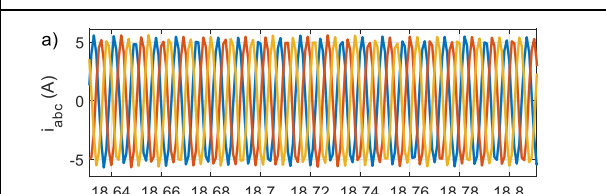


Fig. 68 Curenții de fază (detaliu)

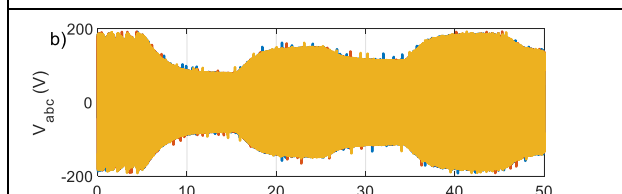


Fig. 69 Anvelopa tensiunilor de fază

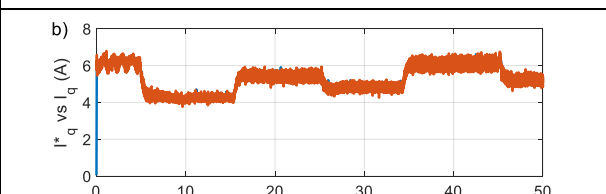


Fig. 70 Referința de curent (albastru) și curentul realizat în axa q

3 CONCLUZII LA ETAPA A TREIA (IAN. – IUL. 2022)

În această etapă, au fost testate cele două subsisteme principale ale sistemului de conversie și stocare a energiei pentru un autobuz/microbuz electric pentru transport urban cu stocare a energiei în supercondensatoare: subsistemul de acționare electrică, respectiv subsistemul de conversie și stocare. În raport au fost prezentate atât rezutatele experimentale obținute la funcționare independentă a subsistemelor, cât și rezultatele experimentale obținute la funcționare integrată, sincronizată. Au fost prezentate datele experimentale pentru 9 experimente desfășurate în laborator, care acoperă o gamă largă de situații de funcționare, practic toate scenariile de bază.

Activitățile din etapa 3/2022 au fost derulate conform planului prevăzut. Toate activitățile prevăzute în etapa 2/2022 au fost integral realizate. **În concluzie, echipa de cercetare și-a îndeplinit obiectivele asumate în planul de realizare pentru etapa 3/2022, și prin urmare toate obiectivele proiectului.**