

DETERMINAREA DE SEMNĂTURI PENTRU CONSUMATORI CASNICI PE BAZA DATELOR ÎNREGISTRATE DE CONTOARELE INTELIGENTE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat INGINERIA SISTEMELOR

autor ing. Grando (căs. Căiman) Dadiana-Valeria

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Toma-Leonida Dragomir

luna 10 anul 2021

În contextul managementului consumului de energie direcționat înspre reducerea acestuia, teza de doctorat propune ca obiect de studiu identificarea dispozitivelor electrocasnice prezente în zona rezidențială pe baza măsurătorilor de tensiune și curent realizate de contoarele inteligente. Este un fapt deja cunoscut că valoarea consumului raportat în zona rezidențială este de aproximativ 28% din volumul consumului total de energie care include domenii ca: agricultura, industria, servicii, transport etc..

Teza are o structură liniară conținând 5 capitole cu idei ce se succed în ordine. Teza se extinde pe 132 pagini. Ea include, pe lângă cele 5 capitole, 3 Anexe (A - funcțiile suport asociate celor 4 clase tangentă, tangentă discontinuă, elipsă și hibridă, B - valorile parametrilor soluțiilor din studiile de caz prezentate în capitolul 4, C - implementarea MATLAB), 48 figuri, 15 tabele și 78 de titluri bibliografice dintre care 4 ale autoarei tezei, toate ca prim autor.

În rezumat, capitolul 1 -INTRODUCERE- tratează tema de cercetare, scopul cercetării și obiectivele tezei. Tema de cercetare propusă constă în prezentarea și argumentarea unei noi maniere de obținere a semnăturilor consumatorilor casnici. În contextul tezei, semnătura reprezintă o expresie analitică de forma $i = f(v, \pi)$ ce modelează dependența tensiune-curent pentru consumatorul aflat în discuție (i – curent, v – tensiune, π - parametri). Scopul cercetării constă în investigarea profilului de consum al clientului rezidențial pe baza înregistrărilor de tensiune și curent efectuabile cu un contor inteligent, și caracterizarea acestui profil prin intermediul semnăturii. Obiectivele tezei se conturează în mod logic din enunțul temei și din scopul cercetării. Astfel, *obiectivul general al tezei* îl constituie investigarea posibilității de obținere a unor semnături pentru consumatori casnici din măsurători realizate cu o frecvență mică (20Hz) de eșantionare, potrivit posibilităților contoarelor de energie electrică inteligente actuale. *Obiectivele specifice* vizează: efectuarea de o manieră non-invazivă a investigărilor experimentale, folosirea ca descriptori electrici a perechilor tensiune-curent furnizate de contoarele inteligente (traectoria tensiune-curent), descriptori ce vor fi elementul definitoriu în calcularea semnăturii, definirea unor clase de consumatori ce să permită gruparea dispozitivelor electrice funcție de traiectoria tensiune-curent.

Capitolul 2, denumit „PROBLEMATICA SEMNĂTURILOR CONSUMATORILOR CASNICI ȘI ÎNCADRAREA TEMEI DE CERCETARE”, este conceput în jurul unui studiu bibliografic orientat spre creionarea stadiului actual al cercetării în domeniul tezei de doctorat și pe încadrarea temei tezei în aceste cercetări. Se cuvine subliniat faptul că preocupările legate de caracterizarea consumului energetic în domeniul rezidențial prin semnături au debutat în 1992 cu articolul lui Hart [1]. Din punctul de vedere al structurării informațiilor obținute din studiul bibliografic s-a avut în vedere pe de o parte menționarea ariilor de cunoaștere vizate, în

primul rând din perspectivă aplicativă, [2], iar pe de alta parte prezentarea unui set de instrumente specifice. Termenul „instrumente specifice” include: metodele aplicate pentru determinarea semnăturii, tipurile de descriptori folosiți, precum și bazele de date utilizate pentru a defini semnături și pentru a testa metode.

Menționăm câteva exemplificări pentru fiecare instrument specific:

- Descriptori electrici: puterea activă [1], puterea reactivă [1], puterea aparentă, factorul de putere, forma de undă $i(t)$ a curentului, forma de undă $v(t)$ a tensiunii și armonicele de tensiune, traiectoria tensiune-curent [3] - [12], variația puterii instantanee în regim tranzitoriu, variația amplitudinii de putere, durata regimului tranzitoriu etc.
- Metode de determinare a semnăturii: tehnici de optimizare clasice, metode statistice și probabilități, „machine learning” / „pattern recognition” [3] – [12], tehnici de procesare de semnale, algoritmi evoluționiști, procesare de limbaj.
- Baze de date folosite: REDD (Reference Energy Disaggregation Dataset) 16.5 kHz [4], [5], [7], [11] PLAID (Plug-Load Appliance Identification Dataset) 30 kHz [8], [9], [12], [11] WHITED (Worldwide Household and Industry Transient Energy Dataset) 44.1 kHz, per dispozitiv, UK-DALE (UK- Domestic Appliance-Level Electricity) 16 kHz, BLUED (Building-Level fully-labeled dataset for Electricity Disaggregation) 12 kHz, HELD1 (Home Equipment Laboratory Dataset) 4 kHz, COOL (Controlled On/Off Loads Library) 100 kHz, ACSF2 (Appliance Consumption Signature- Fribourg 2) 1 Hz, 10 Hz, Tracebase 1 Hz.

Capitolul se încheie cu punctarea următoarelor concluzii: i) tema de cercetare este de actualitate, fapt confirmat și de cele 32 articole citate din care 28 corespund intervalului de publicare 2016-2021; ii) frecvențele de achiziție folosite în cercetări sunt de nivelul zecilor de kHz, domeniul frecvențelor joase nefiind investigat.

Capitolul 3, intitulat „FUNDAMENTAREA METODOLOGIEI APLICATE ÎN TEZĂ”, reprezintă partea esențială a tezei. El include dezvoltarea unei metodologii de lucru vizavi de obiectivul propus. La începutul capitolului se introduce terminologia de lucru care include, pe de o parte, termeni consacrați din domeniul energetic, pe de altă parte, termeni specifici metodologiei propuse. Din prima categorie menționăm: contorul de energie inteligent, privit din perspectiva funcționalităților minimale pe care trebuie să le îndeplinească, rețeaua inteligentă și infrastructura de măsurare. A doua categorie include: consumatorul multiplu (termen folosit adesea sub forma de consumator n multiplu unde n reprezintă numărul de dispozitive electrice pe care le include), semnătura consumatorului simplu (expresie analitică de forma $i = f(v, \pi)$ ce aproximează traiectoria tensiune-curent a consumatorului simplu), semnătura consumatorului n multiplu (ansamblu de expresii analitice de forma $i = f(v, \pi)$ ce aproximează traiectoria tensiune-curent pentru un consumator n multiplu), semnătura echivalentă (una sau mai puțin de n semnături asociate consumatorului n multiplu).

După cum s-a precizat, o semnătura are o expresie de forma $i = f(v, \pi)$. Odată adoptată expresia funcției suport f , determinarea semnăturii devine problema calculării parametrilor π . Având în vedere formele neliniare ale funcțiilor suport în raport cu parametri, pentru determinarea lor s-a recurs la regresia neliniară. În acest context f , i și v sunt denumite, respectiv, estimator, regresor și predictor. Problema impune determinarea unui set de parametri π astfel încât funcția f să urmărească cât mai fidel norul de puncte rezultat din măsurători. Figura 1 redă acest aspect: cu roșu este reprezentată semnătura obținută, iar cu albastru norul de puncte de la care s-a plecat, aferent măsurătorilor.

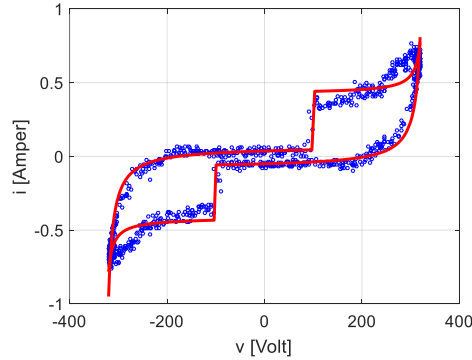


Fig 1. Norul de puncte M — albastru —vs. funcție suport — roșu — pentru un consumator din-clasa tangentă discontinuă.

Graficul din figura 1 evidențiază că o semnătură are două ramuri, o ramură ascendentă, respectiv o ramură descendentă. Analitic, aceasta se traduce prin faptul că estimatorul f este o reuniune de două expresii corespunzătoare celor două ramuri.

Metodele de regresie conduc la soluții de aproximare obținute prin folosirea de algoritmi de optimizare. În teză s-au folosit doi algoritmi: algoritmul genetic, respectiv algoritmul de tip PSO. În cazul algoritmului genetic (AG), individul este constituit din setul de parametri π , iar în cazul algoritmului de tip PSO parametrii reprezintă particulele din roi. Funcția fitness folosită de ambii algoritmi este:

$$F_{\text{fitness}} = \frac{1}{N_r} \cdot \sum_{j=1}^{N_r} \left[|i_j - i(v_j)|^{n_j} \cdot \left(1 + 0.2 \cdot e^{-|v_j/V|} \right) \right].$$

Ea penalizează suma valorilor absolute ale diferențelor dintre curentul $i(v_j)$, măsurat la o tensiune v_j , și curentul i_j , calculat pentru aceeași tensiune, ponderate. Expresia a fost obținută empiric pe baza studierii comportării mai multor tipuri de consumatori, încadrați în final în 4 clase.

Cele 4 clase propuse în cadrul tezei -tangentă, tangentă discontinuă [13], elipsă [14] și hibridă [15]- sunt reprezentate grafic în fig. 2.

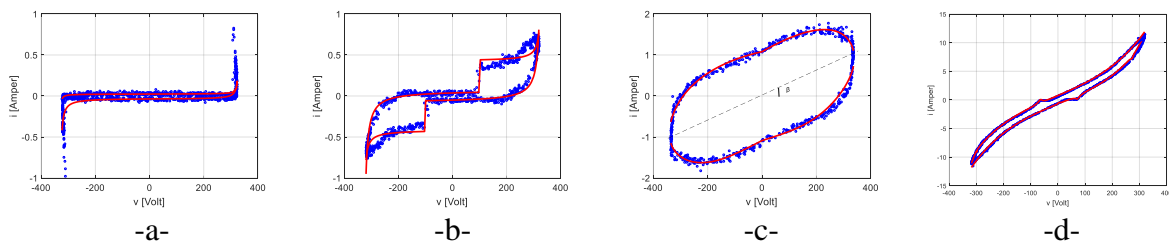


Fig. 2 Nor de puncte (albastru) versus semnătură (roșu): a) clasa tangentă, b) clasa tangentă discontinuă, c) clasa elipsă, d) clasa hibridă.

Potrivit celor expuse anterior, scopul cercetării întreprinse este de a propune metode și instrumente care să permită determinarea semnăturii unui consumator n multiplu dintr-o secvență de măsurători achiziționate cu o frecvență de 20 Hz și având o durată de 51 s. În aceste condiții secvența cuprinde un număr de 1024 perechi de eşantioane tensiune-curent ce formează norul de puncte pe baza căruia se generează semnăturile. Ansamblul metodelor și instrumentelor propuse pentru obținerea semnăturilor alcătuiesc un agregat de algoritmi pe care l-am denumit „generator de semnături”. El include algoritmi de alocare (divizarea norului de puncte în submulțimi aferente celor două ramuri ascendentă și descendentă, respectiv excluderea punctelor ce introduc perturbații exagerate [13]), de stabilire a configurației de lucru (operație determinată de tipul de consumator, respectiv de tipul de semnătură ce se dorește a fi

determinată), de determinare a clasei de apartenență, evaluarea setului de parametri π prin regresie -folosind ca instrument de calcul algoritmi genetici sau PSO-, procedee de selectare a semnăturii.

În fig. 3 este redată schema de măsurare folosită pentru obținerea semnăturilor. Achiziția celor 1024 perechi tensiune-curent cu o frecvență de 20 Hz se realizează folosind un microcontrolerul SPTM32 regăsit în arhitectura contoarelor inteligente. Datele achiziționate sunt transmise unui calculator pentru prelucrări ulterioare cu scopul final de generare a unei semnături.

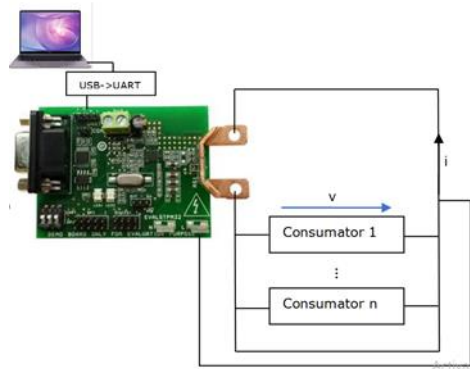


Fig. 3. Schema de măsurare.

Figura 4 sintetizează operațiile principale din generatorul de semnături. În figură este reprezentată organigrama metodei de determinare a semnăturilor. Succesiunea operațiilor depinde de tipul de consumator, iar în cazul consumatorului n multiplu de varianta de semnătură ce se dorește a fi generată (varianta 1, varianta 2, varianta 3) [16].

Algoritmul de determinare a semnăturii include un set de operații de depind de tipul de consumator: consumator simplu, respectiv consumator multiplu.

- *Operații specifice Consumatorului simplu* [15]:
 - ✓ determinarea mulțimilor M_a , M_d (algoritm de alocare);
 - ✓ alegerea claselor de lucru (alegerea configurației);
 - ✓ stabilirea numărului de rulări independente (alegerea configurației);
 - ✓ calcularea fitnessului și estimarea parametrilor asociați claselor alese, prin regresie neliniară folosind algoritmi de optimizare, plecând de la funcțiile suport asociate claselor;
 - ✓ selectarea semnăturii pe baza fitnessului minim.
- *Operații specifice Consumatorului multiplu:*
 - ✓ determinarea mulțimilor M_a , M_d (algoritmul de alocare);
 - ✓ alegerea combinațiilor claselor de lucru (stabilirea configurației);
 - ✓ alegerea ponderilor de lucru (stabilirea configurației);
 - ✓ stabilirea numărului de rulări independente (stabilirea configurației)
 - ✓ calcularea: fitnessului asociat unei combinații, frecvenței de apariție a unei combinații, parametrilor asociați unei combinații, prin regresie neliniară folosind algoritmi de optimizare, plecând de la funcțiile suport asociate combinațiilor alese;
 - ✓ selectarea semnăturilor propriu-zise sau echivalente funcție de elementele calculate mai sus sau funcție doar de fitnessul minim.

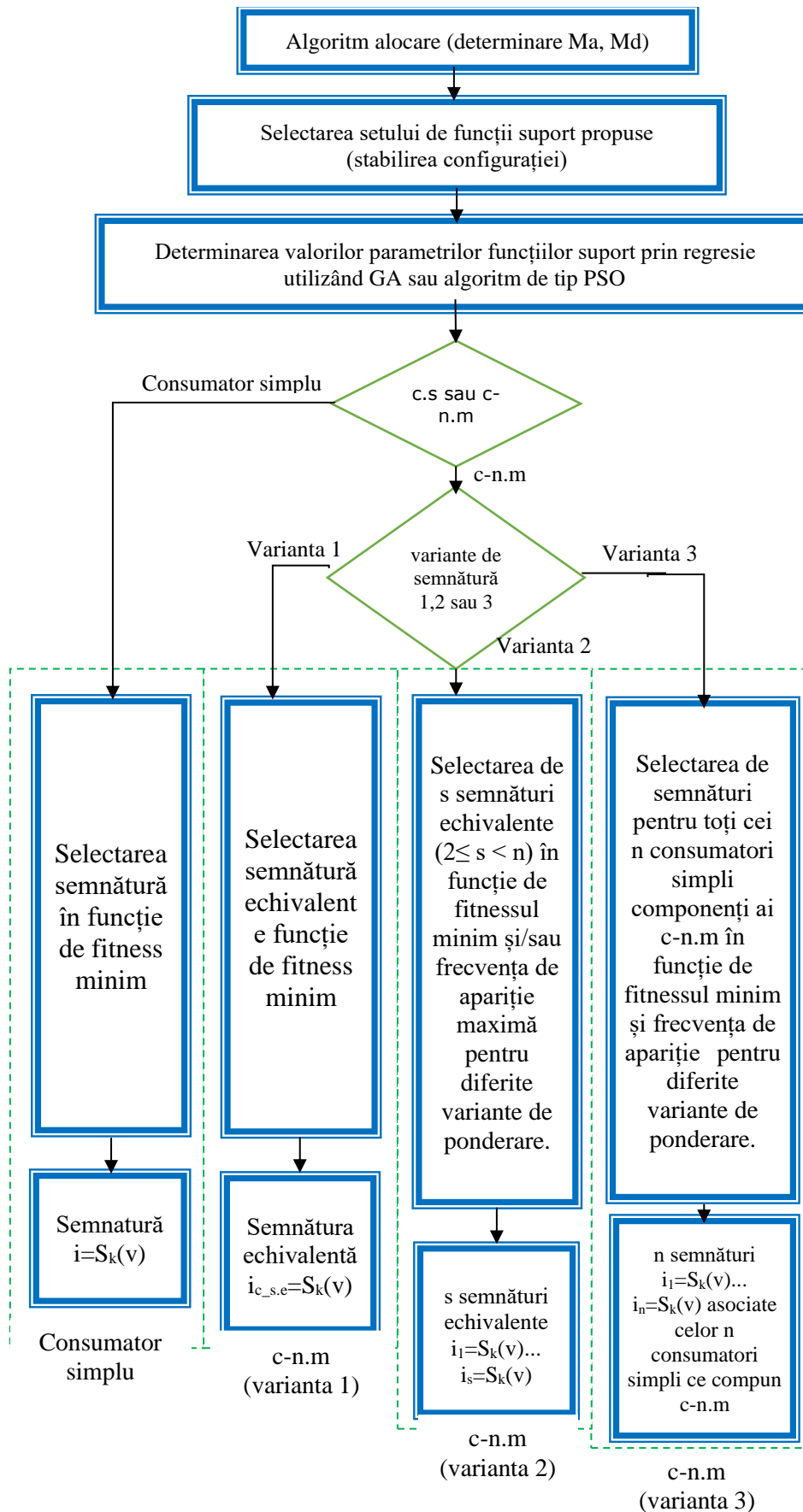


Fig.4 Organigrama metodei de determinare de semnături.

Capitolul 4 tratează „STUDII DE CAZ”. Acestea validează metodologia propusă în capitolul 3. Studiile de caz se referă la 4 consumatori simpli și doi consumatori 2 multipli. Alegerea consumatorilor s-a făcut funcție de următoarele criterii:

- ✓ tipul consumatorului (simplu sau multiplu),
- ✓ algoritmul de determinare a semnăturii aplicat în cazul unui consumator multiplu (3 variante),
- ✓ clasa căreia îi aparține consumatorul,
- ✓ procentul reprezentat de puterea activă a unui consumator simplu din puterea activă totală P consumată de consumatorul n multiplu.

Astfel, cu titlu de „consumator simplu” au intrat în discuție: un televizor LCD (clasa tangentă discontinuă), un laptop (clasa tangentă), un frigider (clasa elipsă), și un aspirator (clasa hibridă), iar cu titlul de consumatori 2 multipli au fost considerate cazurile: laptop +televizor, respectiv laptop+aspirator.

În Fig. 5 sunt reprezentate semnăturile celor 4 consumatori simpli în următoarea ordine: a) laptop, b) televizor, c) frigider, d) aspirator. Ele au fost obținute folosind ca algoritm de optimizare un algoritm genetic. În cazul aplicării celui de-al doilea algoritm, cel de tip PSO, singura diferență constă în încadrarea laptopului în clasa tangentă discontinuă și nu în clasa tangentă. Restul rezultatelor obținute sunt similare.

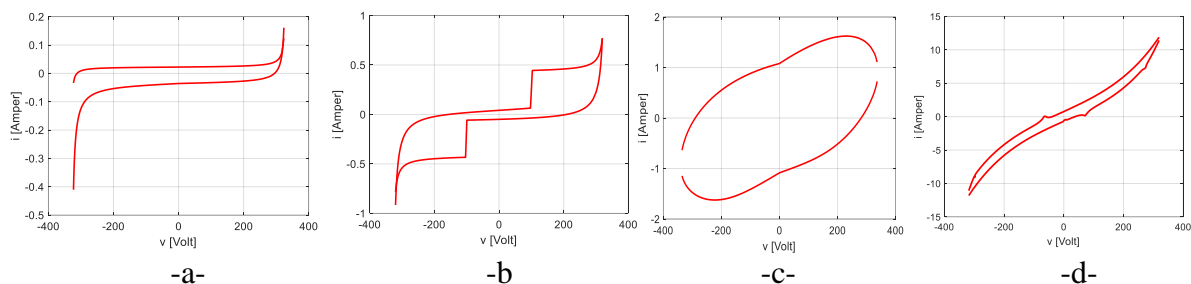


Fig. 5 Semnături consumatori simpli: a) laptop; b) televizor; c) frigider; d) aspirator.

Pentru cazul consumatorului 2 multiplu se au în vedere varianta 1 și varianta 3 (pentru consumatorul 2 multiplu varianta 2 și 3 sunt identice), variante reprezentate în organigrama de determinare a semnăturii (fig. 4). În cazul variantei 1 este selectată o semnătură echivalentă asociată consumatorului 2 multiplu. În Fig. 6 sunt reprezentate semnăturile obținute pentru cele două cazuri: laptop+televizor (stânga), laptop+aspirator (dreapta). Pentru calculul parametrilor pentru prin regresie s-au folosit algoritmi genetici. Rezultate similare s-au obținut în cazul aplicării algoritmilor de tip PSO.

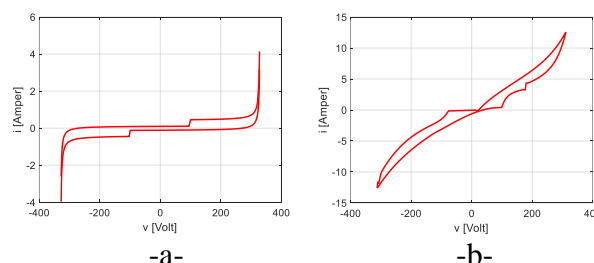


Fig. 6 Semnături tip consumator echivalent (AG): a) laptop+televizor b) laptop+aspirator.

În cazul variantei 3 de selectare a semnăturii pentru cazul laptop+televizor, descompunerea curentului total consumat conduce la rezultatele din fig. 7. Din expresiile matematice se pot observa ponderile rezultate pentru laptop (0.8) – consumatorul 1, televizor (0.2) – consumatorul 2, ponderi ce reflectă diferența de puteri dintre cei doi consumatori. Din

punctul de vedere al încadrării în clase, laptopul este asociat clasei tangentă discontinuă, iar televizorul în clasa hibridă.

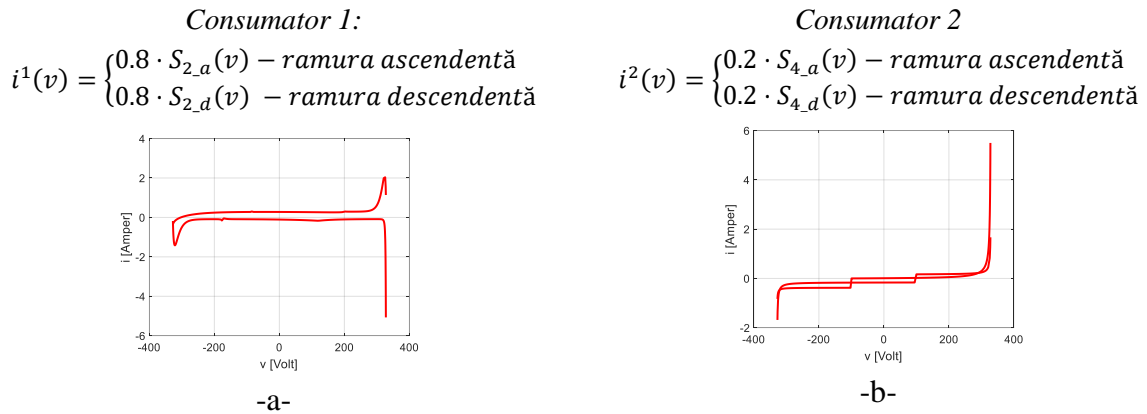


Fig 7. Descompunere tip consumator 2 multiplu pentru laptop+televizor: a) semnătură laptop, b) semnătură televizor.

Similar, în figura 8 este reprezentată descompunerea curentului total consumat în cazul consumatorului 2 multiplu laptop+aspirator.

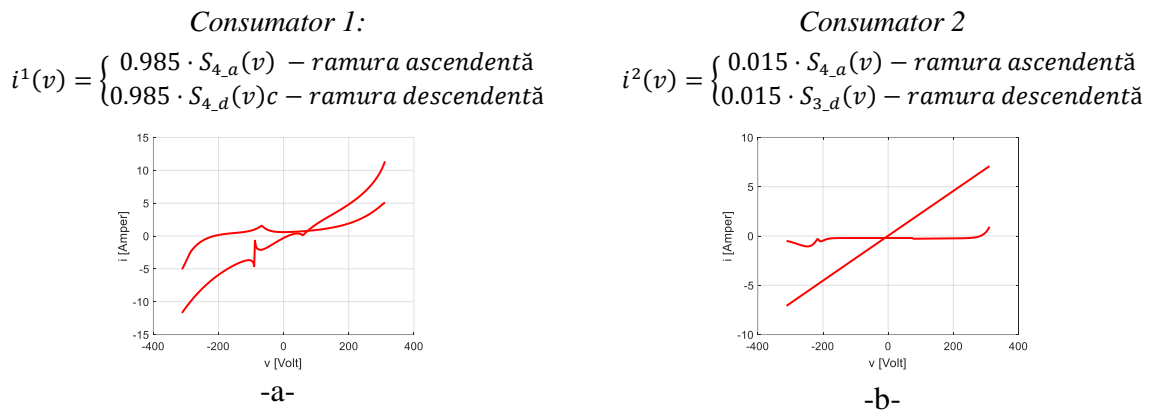


Fig 8. Descompunere tip consumator 2 multiplu pentru laptop+aspirator: a) semnătură laptop, b) semnătură aspirator.

Reprezentările grafice din fig. 7 și fig. 8 au fost obținute folosind ca algoritm de optimizare algoritmul genetic.

Comparând rezultatele obținute prin folosirea în cadrul regresiei neliniare a celor doi algoritmi de optimizare, s-au desprins următoarele concluzii:

- ✓ În cazul consumatorilor simpli ambii algoritmi de optimizare conduc la semnături fidele, fitnessurile obținute fiind de valori apropiate, iar în ceea ce privește timpii de execuției, aceștia sunt mai mici în cazul algoritmului de tip PSO.
- ✓ În cazul consumatorilor 2 multipli:
 - În varianta 1, a consumatorului simplu echivalent, fitnessurile și clasele de apartenență ale semnăturilor obținute sunt similare, iar timpii de execuție au valori mai bune în cazul algoritmului de tip PSO.
 - În varianta 3:
 - pentru consumatorul laptop+televizor, AG furnizează o soluție –o pereche de semnături- de tip minim global cu corespondent fizic, pe când algoritmul de tip PSO nu furnizează o astfel de soluție, dar acest lucru nu exclude soluții de tip minim local;
 - pentru consumatorul aspirator+laptop, în cazul adoptării unor soluții

cu corespondent fizic, acestea au corespuns atât pentru AG cât și pentru PSO unor minime locale cu o frecvență de apariție mică;

- valorile fitnessurilor și timpilor de execuție sunt mai mici în acest caz pentru algoritmul de tip PSO.

În capitolul 5, CONCLUZII, sunt punctate contribuțiile autoarei împreună cu posibile direcții de dezvoltare a cercetării. **Contribuția globală** a cercetării din teză constă în demonstrarea posibilității de a determina semnături ale consumatorilor casnici uzuali folosind înregistrările contoarelor inteligente, adică înregistrări efectuate cu o frecvență de achiziție redusă.

O altă concluzie importantă este faptul că metodologia de lucru propusă în teză reunește mai multe **procedee originale** având ca obiect:

- ✓ Selectarea din mulțimea punctelor măsurate a punctelor folosite pentru determinarea semnăturii, punctele măsurate reprezentând perechi de forma (tensiune-curent) care, după aplicarea selectării, sunt considerate ca traiectorie tensiune-curent ce constituie de fapt descriptorul electric ales pentru determinarea ulterioară a semnăturilor;
- ✓ Asocierea de semnături prin estimarea valorilor parametrilor funcțiilor suport prin regresie neliniară folosind ca algoritmi de optimizare AG și algoritmi PSO pentru următoarele situații:
 - semnături pentru consumatori simpli determinate pe baza traiectoriilor tensiune-curent pentru patru consumatori de clase diferite
 - semnături echivalente pentru consumatori 2-multipli pe baza traiectoriilor tensiune-curent comune pentru două cazuri de consumatori 2 multipli;
 - semnături asociate consumatorilor componenți ai unor consumatori 2 multipli pe baza traiectoriilor tensiune-curent comune;
- ✓ Validarea semnăturilor.

În categoria direcții posibile de dezvoltare a cercetării în teză se menționează:

- ✓ valorificarea potențialului metodologiei folosite în teză prin extensia numărului de clase de consumatori casnici și, corespunzător, a tipului de funcții suport;
- ✓ studierea influenței măririi numărului de puncte de măsurare asupra calității semnăturii prin extinderea duratei de achiziție a punctelor tensiune-curent;
- ✓ aplicarea metodologiei folosite în teză la consumatori de putere superioară celor casnici uzuali.

Bibliografie:

1. G. W. Hart, *Nonintrusive Appliance Load Monitoring*, Proceedings of the IEEE, vol. 80, nr. 12, pp. 1870-1871, 1992.
2. K. Carrie Armel, A. Gupta, G. Shrimali, A. Albert, *Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity*, Energy Policy, vol. 52, pp. 213-234, 1, 2013.
3. H. Y. Lam, G. S. Fung, W. K. Lee, *A novel method to construct taxonomy electrical appliances based on load signatures*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 53, nr. 2, pp. 653-660, 5, 2007.
4. N. Iksan, J. Sembiring, N. Haryanto, S. H. Supangkat, *Appliances identification method of non-intrusive load monitoring based on load signature of V-I trajectory*,

- 2015 International Conference on Information Technology Systems and Innovation, ICITSI 2015 - Proceedings, pp. 1-6, 3, 2016.
5. T. Hassan, F. Javed, N. Arshad, *An empirical investigation of V-I trajectory based load signatures for non-intrusive load monitoring*, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, nr. 2, pp. 870-878, 3, 2014.
 6. L. Du, D. He, R. G. Harley, T. G. Habetler, *Electric load classification by binary voltage-current trajectory mapping*, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, nr. 1, pp. 358-365, 1, 2016.
 7. A. L. Wang, B. X. Chen, C. G. Wang, D. D. Hua, *Non-intrusive load monitoring algorithm based on features of V-I trajectory*, *Electric Power Systems Research*, vol. 157, pp. 134-144, 4, 2018.
 8. L. De Baets, T. Dhaene, D. Deschrijver, M. Berges, C. Develder, *VI-based appliance classification using aggregated power consumption data*, *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2018*, pp. 179-186, 7, 2018.
 9. L. De Baets, J. Ruysinck, C. Develder, T. Dhaene, D. Deschrijver, *Appliance classification using VI trajectories and convolutional neural networks*, *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 32-36, 1, 2018.
 10. S. Wang, H. Chen, L. Guo, D. Xu, *Non-intrusive load identification based on the improved voltage-current trajectory with discrete color encoding background and deep-forest classifier*, vol. 244, Elsevier, 2021, p. 111043.
 11. Y. Han, Y. Xu, Y. Huo, Q. Zhao, *Non-intrusive load monitoring by voltage-current trajectory enabled asymmetric deep supervised hashing*, *The Institution of Engineering and Technology*, 2021.
 12. R. de Paula Rodrigues, P. M. da Silveira, *Curvature scale space-based signatures for electrical load classification in NILM*, vol. 103, Springer, 2021, pp. 1239-1252.
 13. D. V. Caiman, T. L. Dragomir, *Non intrusive load monitoring: Analytic expressions as load signature*, *SACI 2018 - IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Proceedings (SACI)*, pp. 15-20, 8, 2018.
 14. D. V. Caiman, T. L. Dragomir, *Two voltage-current load signature classes for residential consumers*, *2018 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2018 - Proceedings*, pp. 176-181, 11, 2018.
 15. D. V. Caiman, T. L. Dragomir, *Empirical voltage-current signatures for individual household consumers obtained by non-linear regression*, *Studies in Informatics and Control*, vol. 28, nr. 2, pp. 201-212, 2019.
 16. D. V. Caiman, T.-L. Dragomir, *A Novel Method for Obtaining the Signature of Household Consumer Pairs*, *Energies*, vol. 13, nr. 22, p. 6030, 11, 2020.