



REZUMATUL TEZEI

Achiziția, stocarea și transmisia datelor
în timp real de la un prototip SMU
către centrul de corelare

cercetări asupra îmbunătățirii
observabilității în rețelele WAMPAC

Autor: **Ing. Mihail POPA**

Conducător științific: **Prof. Dr. Ing. Răzvan MĂGUREANU**, catedra MMAE

Cuvânt înainte

Teza intitulată „Achiziția, stocarea și transmisia datelor în timp real de la un prototip SMU către centrul de corelare”, elaborată de către Ing. Mihail Popa se înscrie în domeniul de actualitate al ingineriei electrice, având de asemenea caracteristici multidisciplinare prin implementarea de concepte, principii, tehnologii și soluții din domenii adiacente precum cele ale telecomunicațiilor, securității datelor și ingineriei calculatoarelor.

Tratând un subiect de mare interes la ora actuală – observabilitatea în rețelele WAMPAC și WAMS, această teză aparține de asemenea ariei de cercetare a rețelelor inteligente de distribuție a energiei electrice (cunoscute și sub numele global de „smart grids”). Lucrarea are structura unui demers științific, urmărind expunerea unei serii de probleme observate de-a lungul cercetărilor autorului, analiza asupra limitărilor conceptelor și metodelor de transmisie de date implementate în PMU-urile actuale și propunerea unor noi abordări și concepte interdisciplinare, testându-le totodată prin intermediul unui pilot.

Rezumatul de față reprezintă o sinteză ce pune accentul pe propunerile și rezultatele lucrării. Structura simplificată a lucrării pe capitole principale apare astfel:

CAPITOLUL 1 NECESITATEA ȘI OPORTUNITATEA LUCRĂRII

- 1.1. INTRODUCERE
- 1.2. CONCEPTE INTERDISCIPLINARE APLICATE ÎN INGINERIA ELECTRICĂ
- 1.3. SINTEZA LITERATURII ACTUALE

CAPITOLUL 2 ACHIZIȚIA, STOCAREA ȘI TRANSMISIA DATELOR ÎN TIMP REAL

- 2.1. MACRO-OBSERVABILITATEA REȚELEI ELECTROENERGETICE ÎN CADRUL SISTEMELOR ACTUALE WAMPAC
- 2.2. CONCEPTUL ȘI CARACTERISTICILE PROTOTIPULUI SMU
- 2.3. ACHIZIȚIA ÎN TIMP REAL ÎN PROTOTIPUL SMU
- 2.4. SINCRONIZAREA CEASULUI INTERN AL PROTOTIPULUI SMU CU GPS
- 2.5. STOCAREA DATELOR ÎN PROTOTIPUL SMU
- 2.6. TRANSMISIA ÎN TIMP REAL A DATELOR REALIZATĂ DE PROTOTIPUL SMU

CAPITOLUL 3 PILOT PENTRU TESTAREA ȘI SIMULAREA PROTOTIPULUI SMU

- 3.1. MEDIUL DE TEST AL MICRO-INFRASTRUCTURII WAMPAC
- 3.2. PRIMELE REZULTATE ALE PILOTULUI
- 3.3. SCURTĂ EVALUARE ECONOMICĂ A PROTOTIPULUI SMU

CAPITOLUL 4 CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE, DIRECȚII NOI DE CERCETARE

- 4.1. CONCLUZII FINALE
- 4.2. CONTRIBUȚII PERSONALE
- 4.3. DIRECȚII NOI DE CERCETARE

CAPITOLUL 5 BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

Capitolul 1

Necesitatea și oportunitatea lucrării

1.1. Introducere

Tehnicile de moderne de calcul, telecomunicațiile și securitatea datelor au evoluat substanțial în ultimii ani, oferind oamenilor nenumărate funcționalități noi și simplificând considerabil mobilitatea și comunicarea în contextul actual al globalizării.

În domeniul ingineriei electrice, și mai ales, în aria de cercetare și dezvoltare a rețelilor inteligente de distribuție a energiei electrice (în engleză, denumite pe scurt *smart grids*), procesele de monitorizare și control pot beneficia semnificativ, din multe puncte de vedere, de pe urma unor inovații deja accesibile în domenii paralele (precum telecomunicațiile, criptografia/securitatea și ingineria calculatoarelor), schimbând totodată unele concepțe și perspective clasice despre monitorizare, observabilitate, estimare, prognoză și control.

De exemplu, tehnologiile moderne de comunicații digitale, ce au înlocuit treptat vechile linii telefonice și care au stat la baza dezvoltării soluțiilor digitale de voce (din engleză: VoIP – *Voice over IP*), oferă astăzi o infrastructură în continuă perfecționare pentru transportul în timp real a semnalelor audio în convorbiri telefonice internaționale, conferințe telefonice și video și inclusiv, așa-numita, „tele-prezență” (ce implică un număr ridicat de fluxuri audio și video simultane între participanții la tele-conferință).

Folosirea aceleiași infrastructuri de telecomunicații, nu doar la aplicații media, ci și la monitorizarea, respectiv la îmbunătățirea observabilității depline a „smart grid”-urilor prin transmiterea în timp real și în întregime¹ a tuturor formelor de undă ale semnalelor electrice specifice domeniului ingineriei electrice, este una dintre soluțiile propuse în această lucrare ca și posibil viitor fundament al unei noi strategii de monitorizare și control a „smart grid”-

¹ Întregimea formelor de undă se referă în acest context la o rezoluție și rată de eșantionare foarte înaltă (≥ 12 biți și 44KHz), pentru a permite analiza fenomenelor energetice la intervale de timp începând cu 22 μ s.

urilor, în contextul unor cerințe permanent schimbătoare despre: scara geografică la care se realizează monitorizarea, volumul de date crescător necesar monitorizării și timpul tot mai scurt de disponibilitate a datelor. [capitolul 2.6.1 al tezei]

În cadrul dezvoltării soluției propuse, autorul analizează și prezintă, cum această tehnică modernă a telecomunicațiilor contribuie semnificativ la creșterea performanțelor sistemelor WAMPAC (din engleză: *Wide Area Monitoring, Protection and Control*) și WAMS (*Wide Area Measurement Systems*) printr-o monitorizare în timp real mai detaliată și o observabilitate ridicată a sistemului energetic, apelând la principii și tehnici interdisciplinare (ca de exemplu: reutilizarea unor protocoale de comunicație consacrate și deja perfecționate de-a lungul timpului, sau adaptarea unor algoritmi de compresie-decompresie a datelor la tipologia și natura semnalelor electrice existente pe liniile de transport al energiei electrice). [capitolele 1.2, 2.5 și 2.6]

Suplimentar, această teză pune în discuție și cerințele ce trebuie îndeplinite pentru a atinge într-un mod durabil performanța dorită a integrării cu sistemele WAMPAC existente, ridicând totodată niște semnale de avertisment supra consecințelor nerespectării acestora, necesitatea acestei lucrări născându-se din diferențele semnificative între diverse aspecte constatate de autor de-a lungul cercetării asupra sistemelor WAMPAC și echipamentelor PMU/PDC, evidențiate din următoarele puncte de vedere:

- Implementarea în domeniul ingineriei electrice a unui protocol de comunicație relativ rudimentar (protocolul C37.118), în timp ce domeniul telecomunicațiilor utilizează deja de generații protocoale consacrate și perfecționate pentru transmiterea în timp real a datelor [soluție detaliată în capitolul 2.6 al tezei];
- Lipsa de securitate a datelor transferate între PMU și restul sistemului WAMPAC din care aparține, în timp ce lumea Internetului (pe care se bazează și infrastructura WAMPAC) este cutremurată frecvent de atacuri informatice, la care cercetătorii din domeniul telecomunicațiilor și al criptografiei au răspuns cu succes prin soluții de criptare SSL cu chei asimetrice și pre-validate [capitolul 1.2.2 al tezei];
- Limitarea conectivității între PMU și PDC la un singur sens de permis de inițiere a conexiunii C37.118 (și anume, de la PDC către PMU), fapt ce îngreunează interoperabilitatea între diferite sisteme WAMPAC (ale diferitelor companii), în timp ce rețelistica TCP/IP modernă folosește deja soluții perfecționate de virtualizare a rețelelor de date (prin așa-numitele tuneluri VPN) [capitolul 1.2.2.2 al tezei];
- Rezoluția de timp mică a formei de undă a semnalului electric oferită de echipamentele PMU (de aproximativ 25 de puncte pe perioadă, echivalent cu 800 μ s), în condițiile în care cercetările și studiile moderne în domeniul ingineriei electrice necesită forme de undă mult mai detaliate (de ordinul a 20 ~ 40 μ s), iar eșantionarea unui semnal la momentul achiziției de date se poate realiza în prezent în mod facil la 44100 Hz cu ajutorul unui calculator personal echipat cu o placă de sunet accesibilă [capitolul 2.3]

În cadrul primelor capitole este prezentată sinteza studiilor autorului cu privire la implementarea actuală a soluțiilor de monitorizare a rețelelor energetice cu ajutorul a trei familii de echipamente utilizate în prezent - „data-logger”, PMU și PDC, analizând avantajele și dezavantajele fiecăruia dintre acestea. De asemenea autorul definește, prezintă și studiază în capitolul ulterior, conceptul hibrid al echipamentului SMU, propus ca soluție pentru îmbinarea tuturor avantajelor celor trei familii de echipamente și eliminarea limitărilor observate. În acest fel, lucrarea de față deschide noi direcții de cercetare (prezentate în detaliu în cadrul capitolului 4.3.) privind:

- Optimizarea algoritmilor de compresie-decompresie pentru tipurile și natura semnalelor electrice existente pe liniile de transport al energiei electrice, cu scopul de a atinge o rată de compresie a datelor transmise cât mai ridicată, asigurând totodată integritatea informației la receptor, după decompresie.
- Mecanismele de auto-gestiune a echipamentului SMU și a proceselor de monitorizare efectuate de către echipamentul SMU, împreună cu auto-diagnoza echipamentului;
- Implementarea pe suport FPGA a conceptului de SMU, ca și echipament industrial autonom și gestionabil de la distanță, fără intervenție fizică umană;
- Extinderea funcționalităților sistemului PDC pentru încadrarea formelor de undă de înaltă rezoluție, în setul de măsurători ale fazorilor și corelarea referințelor de timp.

1.2. Concepte interdisciplinare aplicate în ingineria electrică

Noțiunile trecute în revistă în acest capitol reprezintă fundamentul integrării interdisciplinare între domeniul ingineriei electrice, din care face parte prezenta teză, și toate celelalte domenii adiacente, din care au fost preluate și adaptate principii, metode și concepte, cu scopul de a elabora soluția propusă de autor în cadrul lucrării. Totodată, aceste noțiuni prezentate în acest capitol sunt structurate în funcție de domeniul de proveniență, precum și după gradul de relevanță în domeniul ingineriei electrice.

În secțiunea 1.2.1 sunt evidențiate necesitatea și principiile de bază ale protocoalelor de transmisiei de date în rețea, utilizate și implementate în cadrul prototipului SMU dezvoltat de autor. Conform nevoilor definite de sistemele WAMPAC pentru monitorizarea rețelelor electrice, un protocol de comunicații de date trebuie, nu doar să asigure transportul acestora de la emițător (echipamentul de măsură) la receptor (sistemul central de gestiune și colectare), ci să garanteze, pe de o parte, faptul că datele au ajuns cu integritate și, pe de altă parte, faptul că timpul necesar transportului este minim.

Așadar, autorul scoate în evidență în cadrul secțiunii 1.2.1 diferențele dintre metodele de transport ale aceluiași set de date prin diferite protocoale prin prisma capacităților de interconectare și securității datelor. Acest din urmă aspect este mai departe evidențiat în

secțiunea 1.2.2, unde autorul pune accentul pe tehnicile moderne de garantare a securității utilizate în proiectarea prototipului SMU și importanța luării acestora în considerare atunci când sunt dezvoltate rețelele/sistemele WAMPAC pentru stabilitatea unui „smart grid”. Soluțiile moderne utilizate în prezent în domenii adiacente sunt de asemenea prezentate succint în cadrul acestei secțiuni, cu accent pe cele două moduri de abordare ale unei conectivități de bază între componentele cheie ale structurii WAMPAC - PMU și PDC – PMU-ul activ, respectiv PMU-ul pasiv (precum este ilustrat în figura 1).

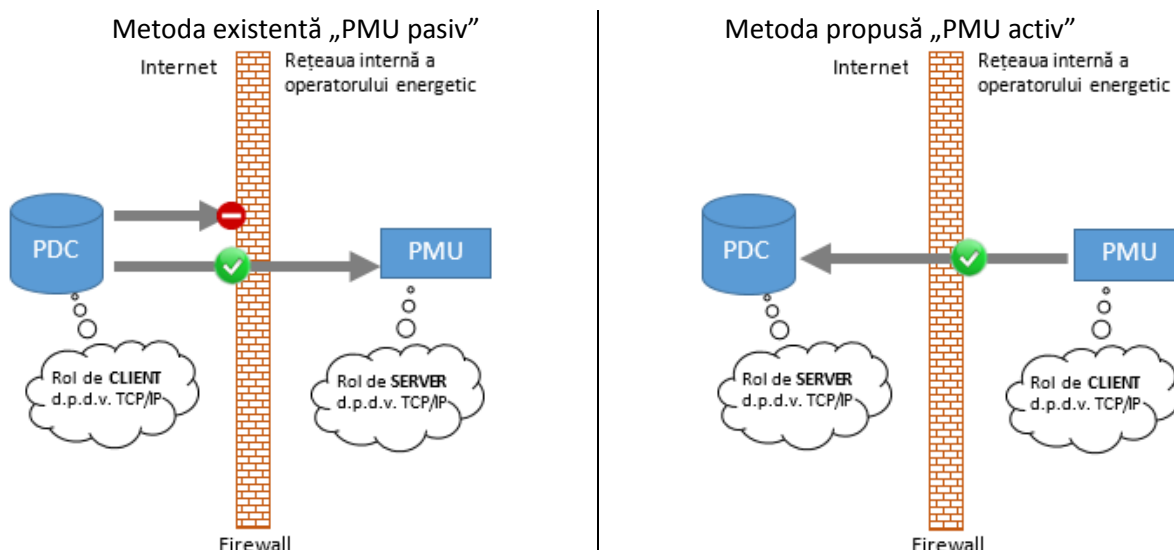


Figura 1. Comparație între cele două variante de implementare a topologiei de comunicație între un PMU și PDC în cadrul unui sistem WAMPAC (sursa: autorul)

Cele două variante de implementare a topologiei de comunicație între un PMU și un PDC în cadrul unui sistem WAMPAC sunt bazate în principal pe noțiunile de *client* și *server* folosite intens în domeniul telecomunicațiilor, care, împreună cu cele de firewall, criptare și compresie de date (cu care sunt strâns corelate) sunt de asemenea discutate în sub-secțiunile 1.2.2.1, 1.2.2.2 și 1.2.2.3, explicitând în particular principiul de bază al securității datelor (precum este ilustrat în figura 2, pentru definirea cerințelor de sistem impuse proiectării prototipului SMU).

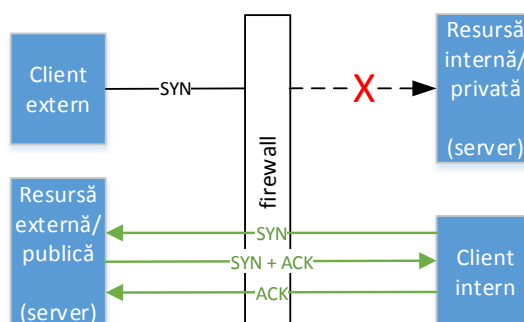


Figura 2. Deosebirea între conexiunea inițiată din exterior (blocată) și cea din interior (permisă) (sursa: autorul)

Echipamentele firewall sunt răspândite în toate mediile de lucru în rețea datorită eficienței lor. Ele sunt eficiente în a bloca accesul nepermis al unor clienți exteriori neautorizați. Practici precum furtul de identitate prin interpunerea între un client autorizat și un server protejat și interceptarea datelor de către alte echipamente de rețea nu pot fi

eliminate sau blocate, decât folosind algoritmi moderni de criptare a datelor bazați pe chei asimetrice¹. În secțiunile ulterioare 1.2.2.3 din teză, autorul demarează un studiu detaliat asupra practicilor curente din cadrul rețelelor WAMPAC de asigurare a securității, identificând limitările conceptelor actuale și propunând principii din criptografia actuală, testate ulterior prin intermediul prototipului SMU.

Capitolul 2

Achiziția, stocarea și transmisia datelor în timp real

Acest capitol conține o integrare atât a elementelor de studiu asupra soluțiilor și implementărilor de ultimă generație în domeniul echipamentelor PMU și rețelelor WAMS și WAMPAC (din engleză: *Wide Area Monitoring, Protection and Control*), realizată de către autor prin cercetări intensive și teste amănunțite, cât și a elementelor de proiectare, prototipare, dezvoltare hardware și software realizare în întregime de către autor și descrise în amănunt în cadrul acestuia.

2.1. Macro-observabilitatea rețelei electroenergetice în cadrul sistemelor actuale WAMPAC și WAMS

În secțiunea 2.1. a tezei, autorul realizează un studiu amănunțit asupra problemelor de observabilitate pe care WAMPAC, urmărind în special implementările din punct de vedere al comunicațiilor și abordărilor de securitate prevăzute de cele mai moderne standarde (precum: C37.118.2-2011 [15], IEC 61850, IEC 60255-118-1 și IEC 62351-1) și implementate în rețele de ultimă generație în Japonia și SUA. Autorii studiului [16] definesc WAMPAC ca fiind un set de echipamente, integrate într-un sistem distribuit pe o scară geografică extinsă, capabile să livreze măsurători „de pe teren” în timp real și să coreleze datele de la mai multe astfel de puncte, cu scopul de a crea o imagine de ansamblu asupra întregii rețele și, în final, să preia controlul în mod automat, în cazul în care stabilitatea sistemului energetic monitorizat începe

¹ Perechi de chei folosite cu scopuri diferite – o cheie dedicată pentru criptare și o altă cheie pentru decriptare

sa se deterioreze. Același studiu definește cele patru stări ale unui sistem energetic, din punct de vedere al stabilității monitorizate de WAMPAC și realizează o reprezentare grafică a stărilor de alertă și a tranzițiilor între acestea (figura 3)

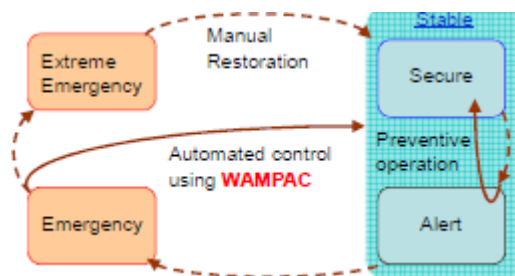


Figura 3. Diagrama stărilor de alertă ale unui sistem WAMPAC (sursa: [16])

Conform reprezentării din figura 3, noua generație a sistemelor WAMPAC preia un dublu rol față de generația anterioară WAMS: (i) în cazul în care sunt observate mici abateri de la starea stabilă, sistemul generează alerte și mesaje de informare, simultan cu luarea de măsuri preventive automate și (ii) în cazul în care se declanșează un fenomen de instabilitate moderată, sistemului WAMPAC intervine automat cu măsuri de control automat (fie proactive, fie retro-active). Limita de distingere între un fenomen de instabilitate moderată și unul de instabilitate ridicată sau extremă este însă greu de conturat și de cele mai multe ori este determinată de factori preponderent economici.

Spre deosebire de generațiile anterioare de infrastructuri WAMS (din engleză: *Wide Area Monitoring Systems*), unde sistemului nu îi era atribuită nici o funcție de control automat [29], ci doar de monitorizare și alertare, în prezent, WAMPAC poate interveni automat în restaurarea echilibrului, doar în anumite condiții studiate și prezentate de autorul tezei în cadrul capitolului 2.1., atunci când datele consolidate de așa-numitele „super-PDC”-uri confirmă gradul de complexitate a perturbației.

O astfel de structură WAMPAC ce integrează conceptul de „super-PDC” este cea dezvoltată în Statele Unite ale Americii, EIPP (*Eastern Interconnection Phasor Projects*) [14, 34, 17] ce integrează operatori de sistem independenți și organizații regionale de transport al energiei electrice către utilizatori, împreună cu modulele sistemului WAMPAC și soluții de vizualizare a rapoartelor consolidate provenite din măsurătorile de pe teren, precum:

- vizualizarea frecvențelor locale pe regiuni și la nivelul nodurilor cheie de interconectare a diferitelor segmente de rețea
- vizualizarea diferențelor de fază pe mai multe arii de monitorizare împreună cu alarmarea timpurie în cazul în care anumite praguri sunt depășite
- vizualizarea variațiilor de tensiune pentru facilitarea identificării sensurilor de transport al puterii active la nivel național

Rolul unui echipament PMU în cadrul vast al unei rețele WAMPAC este în continuare studiat și analizat de către autor în secțiunile 2.1.1. și 2.1.2., din punct de vedere al funcționalităților, fluxurilor de date între componentele acestuia, algoritmi utilizați la realizarea calculului frecvențelor și fazelor instantanee, precum și a modului de transmisie a datelor obținute.

Conform celei mai recente versiuni ale standardului C37.118.2 publicată în 2011 [15], un PMU este definit în mod oficial ca fiind un echipament care produce estimări ale frecvenței și ale ratei de variație a frecvenței (*RoCoF* – din engleză „*Rate of Change of Frequency*”) pornind de la semnalele tensiunilor și curenților electrici din nodul respectiv de rețea și de la un semnal de sincronizare a timpului și construind în final sincrofazori. Nu este definit însă dacă echipamentul PMU trebuie să fie implementat pe o platformă hardware integrată (de exemplu, folosind controllere DSP, arhitecturi FPGA sau alte sisteme de calcul), pe o platformă software sau chiar ca instrument virtual, într-un ecosistem de virtualizare.

În cadrul lucrării [5] publicate de autor în anul 2011 la conferința internațională IEEE SMFG, sunt scoase în evidență cerințele impuse unui sistem PMU din criterii economice, de fiabilitate, disponibilitate și consistență a fazorilor furnizați de un PMU. În urma studiului realizat în această lucrare, este concluzionat faptul că o implementare standard strict conform prevederilor documentației C37.118.2 nu garantează următoarele:

- Securitatea datelor
Datele transferate de la un echipament PMU către unul PDC nu sunt securizate, existând un risc major de pierdere, furt sau alterare a datelor măsurate
Așa cum va fi prezentat în capitolul 3.1, interceptarea transmisiei de date între PMU-urile implementate conform C37.118.2 și PDC este posibilă cu echipamente deloc sofisticate și accesibile oricui;
- Autentificarea PMU-ului la PDC sau a PDC-ului la PMU
În acest fel nu există o certitudine că interlocutorii într-o conexiune PMU – PDC sunt exact cine pretind că sunt, putând exista riscul sever ca un PMU dintr-un nod al „smart grid”-ului să fie identificat în mod eronat ca fiind un PMU din alt nod al aceleiași sau unei alte rețele, iar confuzia parametrilor mășurați (frecvența, RoCoF-ul, fazorii) din mai multe noduri putând reduce la nul siguranța în sistemul WAMPAC.

În ciuda acestor limitări de funcționare, respectiv de implementare, echipamentele PMU studiate de către autor au un cost relativ ridicat de achiziție și integrare, după cum este studiat de către autor în capitolul 3.3. al tezei de doctorat. Acesta este motivul pentru care studii, precum [10, 11] încearcă să găsească plasamentul optim al PMU-urilor în nodurile esențiale ale rețelei, astfel încât numărul necesar de PMU-uri să fie minim, iar observabilitatea întregii rețele să fie maximă, oferind totodată și toleranță la situații când unul sau mai multe PMU-uri se defectează.

2.2. Conceptul și caracteristicile prototipului SMU

În multe domenii, unde sunt necesare observabilitatea și studiul unui fenomen la scară largă, există cerințe specifice de a corela măsurătorile obținute dintr-o multitudine de puncte diferite de manifestare a fenomenului, distribuite geografic la distanțe relativ mari unul față de celălalt, pentru ca imaginea completă a întregului fenomen studiat/observat să poată fi constituită pe baza măsurătorilor din toate punctele de manifestare, ca și un "stop-cadru" la un anumit moment de timp din evoluția fenomenului [26]. În această clasă se încadrează indubitabil și fenomenele energetice în interiorul rețelelor inteligente de distribuție a energiei electrice, în contextul dezvoltării recente și răspândirii accelerate a acestora [3].

Datorită caracterului distribuit geografic, punctele de măsură nu pot fi întotdeauna plasate la distanțele egale față de punctul de corelare a datelor, iar liniile de transmisie a valorilor măsurate, ce leagă fiecare dintre aceste puncte cu cel central, nu pot avea aceleași caracteristici de propagare a semnalelor [11], inducând astfel întârzieri practic imposibil de estimat și de compensat la nivel logic.

Prin urmare, parametrii mășurați în diferitele puncte ce urmează a fi corelate sosesc în punctul central de colectare la momente diferite de timp, deși aceștia au fost mășurați presumabil în același moment de timp. Acest fapt împiedică utilizarea momentului sosirii datelor drept referință de timp pentru corelarea măsurătorilor.

În acest fel, s-a identificat necesitatea, ca datele transmise de la punctele de măsură distribuite geografic să fie deja marcate cu o referință de timp, chiar de la plecarea din fiecare punct de măsură, iar referințele tuturor acestor puncte să coincidă. Drept efect, în procesul de corelare a parametrilor mășurați din toate punctele considerate, nu sunt luate în considerare momentele de sosire a datelor, ci doar referințele de timp asociate fiecărei valori măsurate și transmise, de către fiecare dintre echipamentele de măsură din acele puncte.

Pentru ca referințele de timp de la nivelul fiecărui punct dintr-un astfel de sistem distribuit să coincidă, este necesar ca echipamentul de măsură din fiecare punct să fie sincronizat, din punct de vedere al ceasului intern, cu echipamentele din toate celelalte puncte de măsură, luând astfel naștere conceptul de *echipament de măsură sincronizat*. Deseori este folosit termenul în limba engleză *synchronized measurement unit* (sau pe scurt *SMU*)¹ pentru simplitate și analogie echipamentele PMU consacrate folosite în prezent în ingineria electrică.

¹În literatura de specialitate, termenul SMU încă nu a fost folosit niciodată ca atare pentru a indica echipamentul care realizează măsurătorile sincronizate, ci doar în forma de "synchronized measurement" sau "synchronized-measurement technology", ce indică metoda/tehnica de măsură. Autorul a folosit pentru prima dată acest termen, pornind de la analogia cu termenul PMU (Phasor Measurement Unit), însă adaptat unui mod de măsurare ce nu presupune un "steady-state" în rețelele de joasă sau medie tensiune, cu frecvență aproape constantă de 50 Hz.

În capitolul 2.2. al tezei de doctorat, autorul introduce noțiunea de SMU, ca un concept hibrid între principiile de funcționare și realizare a măsurătorilor de către echipamente PMU și „data-logger”. Se poate spune despre echipamentele PMU, că întreaga putere de calcul a micro-procesoarelor și DSP-urilor integrate este investită în algoritmi de determinare a fazei și frecvenței instantanee.

Spre deosebire de un echipament PMU, întreaga putere de procesare a unui echipament SMU este canalizată, nu în efectuarea locală a algoritmilor sau operațiilor de calcul al unghiului de fază și a frecvenței instantanee, ci în executarea integrată a următoarelor trei procese (figura 4), conform cerințelor de sistem studiate de autor în secțiunea 2.6.1. a tezei:

- înregistrarea cât mai detaliată (la o rezoluție și fidelitate cât mai înaltă) a formelor de undă a tensiunilor și curenților pe cele trei faze¹
- compresia cât mai eficientă a datelor înregistrate (fără pierderi de informație la momentul decompresiei)
- transmitia în timp real a datelor comprimate sub formă de fluxuri de pachete și gestiunea pachetelor transferate/stocate.

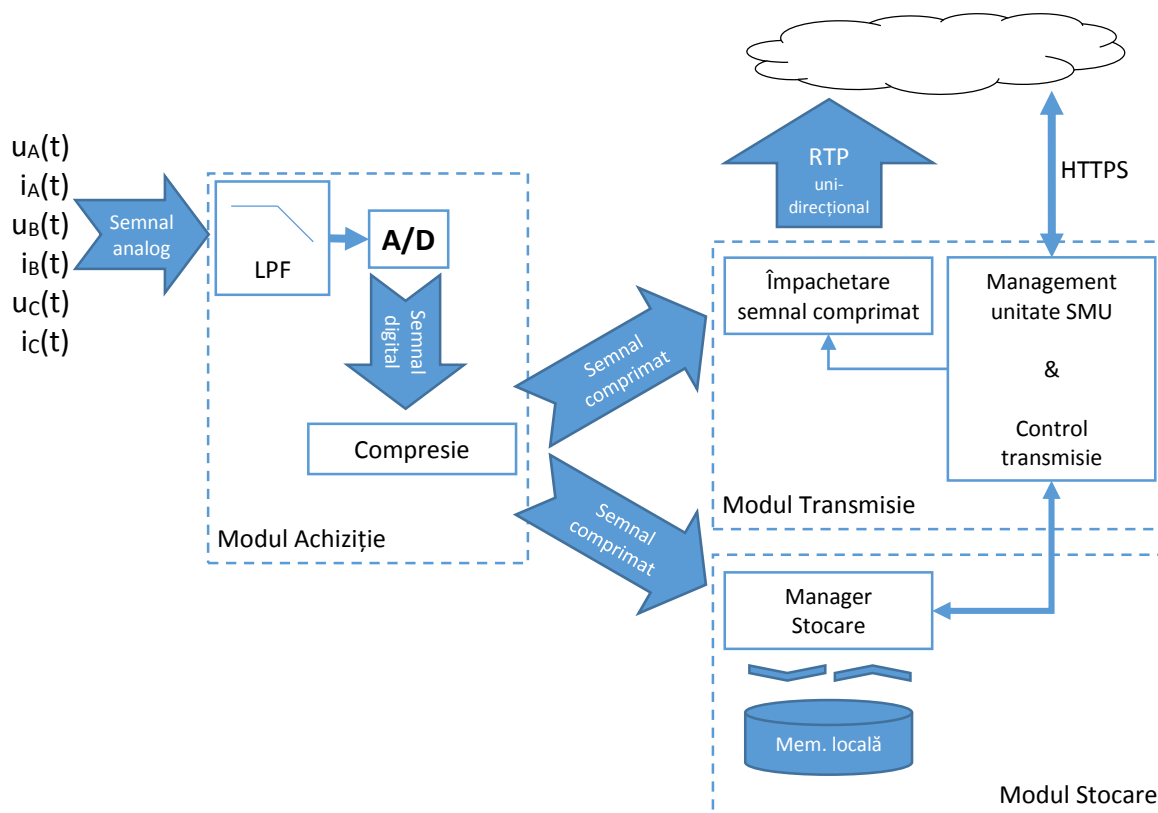


Figura 4. Procesele executate de către echipamentul SMU
(sursa: autorul)

¹ Ideea acestui tip de înregistrare a fost deja luată în considerare și apoi implementată de producătorii unor echipamente denumite în limba engleză „data-logger” precum [36], însă un sistem SMU se deosebește semnificativ, așa cum este prezentat mai departe în secțiunea 0.

O altă categorie interesantă de echipamente folosite intens în studiile rețelilor inteligente de energie electrică sunt așa-numitele echipamente *data-logger*. În limba engleză, termenul face referire la capacitatea de înregistrare (ca și o „cutie neagră”) a tuturor formelor de undă de pe fazele din nodul de rețea unde este conectat echipamentul.

Asemănarea de bază între echipamentul SMU și echipamentul *data-logger* este că ambele sisteme se concentrează pe înregistrarea cât mai fidelă a formelor de undă și nu pe calculul local al unor parametri precum frecvența, rata variației frecvenței sau unghiul de fază.

Spre deosebire de un *data-logger*, un echipament SMU execută procesul de înregistrare, nu doar pe 4 canale (precum este specificat de exemplu în documentația echipamentului UfE folosit și studiat de autor în timpul testelor [36]), ci pe toate cele 6 canale corespunzătoare tensiunii și curentului de pe fiecare dintre faze. În plus, sistemul SMU asigură referința de timp a fiecărui eșantion de forme de undă, pe bază sincronizării GPS. Totodată asigură și transmisia acestora în timp real, nu doar stocarea formelor de undă în memoria locală.

Echipamentul UfE menționat anterior deține o capacitate suficientă de memorare a formelor de undă înregistrate, însă transferul lor de la nodul de rețea (uneori greu accesibil fizic) se face, fie pe baza copierii pe suport portabil de memorie sau prin protocoale de transfer asincron de fișiere, nu prin protocoale în timp real, precum cele analizate și implementate de autor în capitolul 2.6. din cadrul tezei.

Diferența fundamentală dintre principiul de măsurare al echipamentului PMU și cel al echipamentului SMU, constă în externalizarea de către echipamentul SMU a funcției de realizare a calculului / estimării valorilor instantanee ale frecvenței și fazelor către un nod central de procesare, întregul său set de resurse de calcul fiind alocat integral obținerii formelor de undă integrale și la rezoluții foarte înalte.

Ca urmare a translației locului unde este efectuat calculul / estimarea efectivă a frecvenței și fazei instantanee, se naște o discuție interesantă asupra avantajelor și dezavantajelor calculului centralizat, respectiv celui local (descentralizat), prezentate într-o manieră comparativă în tabelul 2 de la pagina 36 din teză. Această translație presupune schimbarea modului cum sunt transmise datele, pentru a garanta că formele de undă nu suferă modificări în timpul transportului și nici că segmente din compoziția acestora nu sunt pierdute, și a modului cum formele de undă recepționate de către centrul de colectare sunt utilizate mai departe la calculul parametrilor electrici de calitate a energiei.

Deoarece calculul acestor parametri nu mai este unul localizat la nivelul fiecărui echipament PMU de pe teren, ci devine unul centralizat bazat pe formele de undă ale fiecărui echipament SMU, puterea de calcul necesară centrului de colectare pentru determinarea acestor parametri în mod centralizat este una ridicată, însă datorită noilor tehnologii computaționale de mare capacitate (similare celor utilizate în *cloud computing*), acest lucru

nu este imposibil. Figura 5 ilustrează conceptul de *cloud computing* și distribuția operațiunilor intensive de calcul pe diferite nivele.

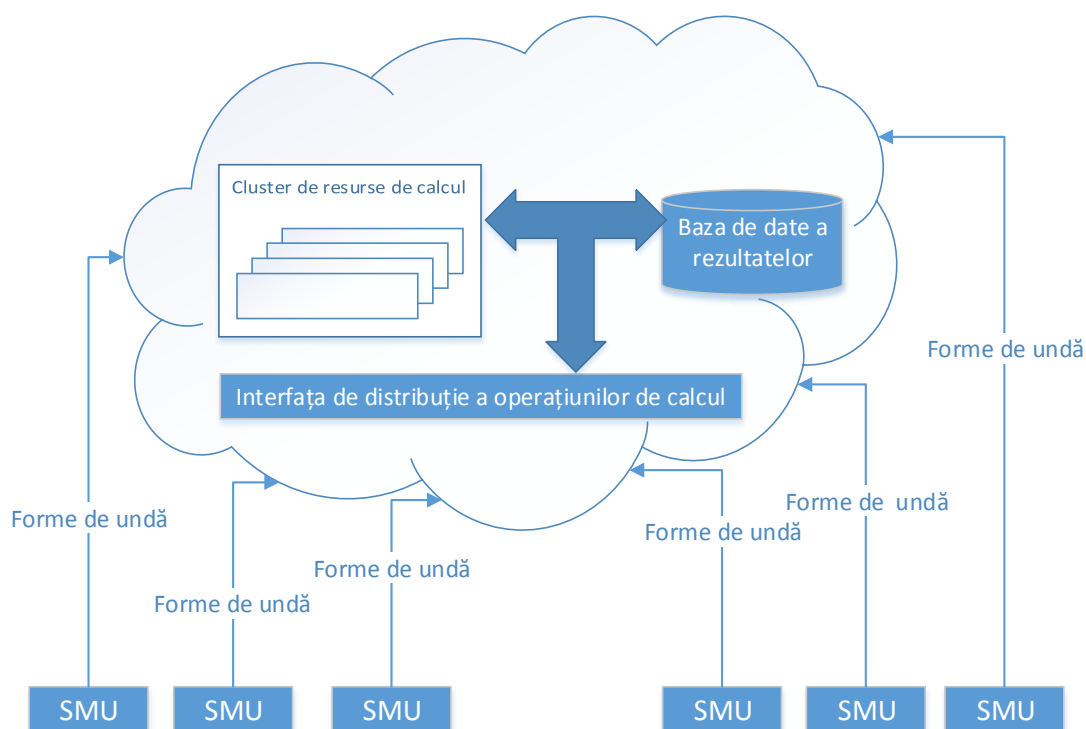


Figura 5. Conceptul de *cloud computing* utilizat în procesarea centralizată a formelor de undă de înaltă rezoluție (sursa: autorul)

Privit ca un echipament de nișă, ce împrumută practic principii de funcționare din două categorii majore de sisteme de monitorizare a stării unei rețele inteligente de energie, prototipul SMU prezintă un potențial important pentru deschiderea de noi posibilități de studii și dezvoltare a algoritmilor de estimare și control bazați pe investigațiile sincronizate ale formelor de undă din toate punctele cheie ce asigură observabilitatea rețelei.

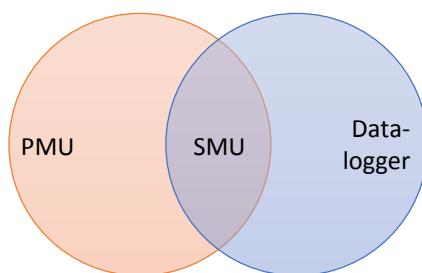


Figura 6. Poziționarea segmentului de nișă a echipamentelor SMU (sursa: autorul)

Acest echipament are statutul unui hibrid (comparație în tabelul 1) între sistemele PMU clasice și unitățile de tip data-logger: efectuează înregistrări de înaltă rezoluție ale formelor de undă (asemănător sistemelor data-logger) pentru 3 x tensiuni și 3 x curenți și, în plus, similar echipamentelor PMU, le asociază o referință exactă de timp și le transmite în timp real.

Descrierea caracteristicii	PMU	Data-Logger	SMU
Conversia semnalului analog (tensiune sau curent) în semnal digital pe fiecare canal din nodul de rețea pentru obținerea formei de undă la rezoluție înaltă	✓	✓	✓
Numărul de canale măsurate 3 canale (de cele mai multe ori numai u_A, u_B și u_C) 4 canale (u_A, u_B, u_C și i_{total}) 6 canale (u_A, i_A, u_B, i_B, u_C, i_C)	x x ✓	✓ ✓ x	x x ✓
Sincronizarea ceasului intern cu o referință certă (ex: GPS)	✓	x ¹	✓
Asocierea unei mărci certe a timpului tuturor măsurărilor realizate	✓	x	✓
Compresia formei de undă pentru o reconstrucție ulterioară fără pierderi (din limba engleză: <i>lossless compression</i>)	x	✓	✓
Înregistrarea / Stocarea în memoria internă a formei de undă de înaltă rezoluție	x	✓	✓
Utilizarea semnalului digital obținut din conversie pentru calculul frecvenței, fazei și pentru determinarea ratei de variație a frecvenței („RoCoF” = <i>Rate of Change of Frequency</i>)	✓	x	x ²
Gestiune primară a înregistrărilor în memoria internă	x	✓	✓
Gestiunea formelor de undă înregistrate în memoria internă: - Retransmiterea unor eșantioane incomplete/lipsă - Ștergerea eșantioanelor transferate și confirmate - Reutilizarea memoriei astfel eliberate	x x x	x x x	✓ ✓ ✓
Transmiterea în timp real a datelor	✓	x	✓
Detalii despre datele transmise în timp real: - Formele de undă la înaltă rezoluție în formă comprimată - Fazorii tensiunilor și curenților - Frecvențele	x ³ ✓ ✓	x x x	✓ x ⁴ x ⁴
Metoda de transmisie a datelor: - Centrul de colectare inițiază conexiune spre echipament (echipamentul joacă rolul de server) - Echipamentul inițiază conexiune spre centrul de colectare (echipamentul joacă rolul de client)	✓ ⁵ x	x x	x ✓
Gestiunea echipamentului de la distanță	✓	✓	✓

Tabelul 1. Comparația caracteristicilor celor trei echipamente de măsură studiate
(sursa: autorul)

¹ Echipamentele Data-Logger de la Schneider Electric și UfE - Umweltfreundliche Energieanlagen GmbH, studiate de către autor nu prezentau componente pentru sincronizarea GPS. În prezent, generațiile noi de echipamente „Data-Logger” (denumite în prezent „Power Meter”) de la Schneider Electric prezintă aparent componente de sincronizare a ceasului intern, însă nu este documentat în totalitate, dacă această sincronizare este folosită și pentru marcarea măsurărilor.

² În cazul utilizării echipamentelor SMU, acest calcul este efectuat centralizat, ținând cont și de formele de undă transmise de SMU-uri din alte locații

³ În cazul PMU-urilor, forma de undă poate fi reconstituită din fazorii transmiși, însă rezoluția acestei forme de undă este redusă.

⁴ Deși echipamentul SMU nu efectuează calculul fazorilor și al frecvențelor, acesta este totuși realizat în mod centralizat de către centrul de colectare și corelare a datelor.

⁵ În cadrul testelor desfășurate de autor cu PMU-ul realizat de Arbiter Systems, s-a concretizat nevoia unei conexiuni suplimentare de tip VPN inițiată în prealabil din partea echipamentului către PDC, pentru crearea suportului de comunicație.

2.3. Achiziția în timp real în prototipul SMU

Noțiunea de *timp real* este un subiect de actualitate, dezbătut în domeniile unde se aplică tehnici moderne de calcul și de procesare a datelor. În concepția multor cercetători precum [20, 8], timpul real este, de fapt, o constrângere asupra termenelor limită pe care trebuie să le respecte un sistem atunci când oferă rezultatele operațiunilor de procesare a datelor inițiale de intrare. În ceea ce privește procesul de achiziție de date, noțiunea de timp real se referă la capacitatea sistemului de a garanta faptul că din semnalul achiziționat de sistem nu lipsesc eșantioane din semnalul original și că semnalul achiziționat tranziționează din starea A în starea B, în același interval de timp ca și semnalul original.

În prezent [8], întregul centru de greutate al procesului de achiziție de date cade pe elementul principal responsabil de conversia semnalului analog în echivalentul sau digital. Acest element este numit în literatura de specialitate *convertor analog-digital* (sau *ADC*, din limba engleză). Cerințele din diverse domenii de aplicare a ADC-urilor au stimulat cercetări intense [8, 12, 21] în scopul optimizării acestor module, în sensul creșterii frecvențelor de eșantionare și a numărului de biți pentru cuantificarea amplitudinii semnalului, precum și a creșterii vitezelor de transfer a valorilor eșantionate, menținând un consum de energie cât mai scăzut. Indiferent dacă estimarea frecvenței într-un smart grid este realizat la nivelul PMU-ului (precum în conceptul actual WAMPAC) sau la nivelul PDC-ului (precum în noul concept WAMPAC), baza implementării unei măsurători precise a frecvenței este acuratețea ratei de eșantionare a semnalului analog de intrare. Aceasta este oferită în mare parte de calitatea cristalului de quarz folosit de oscilatorul ce generează impulsurile de eșantionare.

În trecut, pentru a garanta această acuratețe, un dezvoltator de sisteme numerice de măsură/calcul al frecvenței trebuia să ia în considerare costuri foarte ridicate pentru modulele DAQ de conversie a semnalelor analogice în echivalentul lor digital. Cu cât semnalul măsurat are o frecvență maximă mai mare și cu cât studiile asupra acestuia sunt mai precise, cu atât performanțele și, implicit, costurile modulelor DAQ sunt mai mari.

Pentru scopul realizării prototipului SMU, autorul ia în considerare în cadrul secțiunilor 2.3.1. și 2.3.2. perspectiva unui DAQ bazat pe o placă de sunet uzuală, care, datorită cerințelor moderne în domeniul calculatoarelor personale/de birou au beneficiat de-a lungul timpului de îmbunătățiri tehnologice semnificative [4], simultan cu scăderi importante de costuri.

Autorii studiilor [25, 27, 24] au concluzionat de asemenea că utilizarea plăcilor moderne de sunet din componența calculatoarelor personale/de birou de astăzi pentru măsurarea frecvențelor unor semnale este o alternativă fezabilă la modulele clasice DAQ, atâta timp cât se realizează o corecție soft a abaterilor cauzate de oscilatorul integrat al plăcilor de sunet cu cristal de quarz.

În prezent, majoritatea plăcilor de sunet moderne, cu performanțe comparabile cu cele ale unor convertoare DAQ dedicate, dețin algoritmi de corecție a deviațiilor cauzate de

imperfecțiunile cristalelor de cuarz, fie integrate hardware în chip-ul de control al plăcii, fie software în driver-ul oferit de furnizor ce interferează direct cu kernel-ul sistemului de operare.

În cea de-a doua variantă, este necesară o disciplină externă a ceasului intern al calculatorului pentru a realiza corecția abaterii DAQ. Mai exact, componenta centrală a sistemului de operare (denumită în multe cazuri „*kernel*”) intervine periodic și menține ceasul intern al întregului sistem (și implicit și a plăcii de sunet responsabile cu achiziția semnalelor din rețeaua energetică) în concordanță cu o sursă externă, ca de exemplu un receptor GPS.

În multe alte aplicații, unde se așteaptă ca semnalele analogice achiziționate să aibă un spectru mult mai larg, cu frecvențe maxime de peste 150 kHz (precum domeniul medical), este necesară ca achiziția semnalelor să se realizeze cu echipamente dedicate de tip FPGA. În studiul [9] realizat în domeniul investigațiilor medicale de înaltă precizie, referința externă de timp (ce oferă simultan și o rată constantă de clock) este direct integrată cu convertorul A/D. În domeniul „smart grid”-urilor, însă, domeniul de frecvențe așteptate este mult mai jos, ceea ce face posibilă utilizarea unei componente DAQ fără integrare directă GPS.

Așadar, implementarea achiziției de semnale analogice ($u_A(t)$, $i_A(t)$, $u_B(t)$, $i_B(t)$, $u_C(t)$ și $i_C(t)$) într-un echipament hibrid SMU poate fi realizată fără nici un compromis asupra preciziei, folosind o componentă uzuală de conversie A/D bazată pe un oscilator cu cristal de cuarz, oferind astfel costuri mult mai reduse. Prototipul dezvoltat de autor în cadrul cercetării prezentate în această teză, se bazează pe o astfel de placă de sunet (Maya 44) pentru achiziția semnalelor analogice ale tensiunilor și curenților și transmisia lor în format comprimat (împreună cu referințele de timp GPS) către PDC spre analiză și stocare.

Autorii studiului [23] utilizează o placă de sunet pentru realizarea unui osciloscop multifuncțional virtual. Spre deosebire de prototipul autorului, cel realizat de [23] are ca scop vizualizarea mono- sau bi-canal a formelor de undă ale semnalelor de test, măsurători minore ale semnalelor, precum și comparație a două semnale de intrare simultane. În ambele prototipuri sunt folosite circuite de atenuare și de protecție la supra-tensiuni la intrările plăcii de sunet, deoarece semnalele electrice ale tensiunilor și curenților din nodul „smart grid”-ului considerat depășesc cu mult limita de intrare a plăcii de sunet (în cazul Maya 44, aceasta este de $\pm 48V$)

2.4. Sincronizarea ceasului intern al prototipului SMU cu GPS

Teoria măsurătorilor sincronizate presupune și pornește de la premisa că toate echipamentele care participă la achiziția datelor în mod sincron dețin o referință comună de timp sincronizată prin intermediul unui ceas de mare precizie.

Prin noțiunea de *referință de timp* sau *timestamp* se înțelege faptul că ceasurile interne ale fiecăruia dintre echipamentele considerate „numără” unitățile de timp cu aceeași frecvență de tact, în același ritm și pornind de la aceeași origine comună, iar numărul curent al unității de timp numărate este același la toate echipamentele sincronizate, în orice moment de timp s-ar face un „stop-cadru” al întregii infrastructuri.

La ora actuală, o soluție acceptabilă din punct de vedere economic și relativ ușor de implementat din punct de vedere tehnic este utilizarea unui receptor GPS, care în afară de datele NMEA (poziție geografică, mișcare și UTC) primite de la sateliți să furnizeze și un semnal constant ca durată de timp, prin care să marcheze începutul și sfârșitul unei secunde, cu o acuratețe foarte ridicată (de ordinul nano-secundelor).

Echipamentele PMU utilizate în prezent în cadrul rețelelor WAMPAC integrate cu cele electroenergetice, utilizează sincronizarea cu GPS pentru realizarea unei sinusoide de referință în cadrul controllerelor DSP. Marii producători de echipamente PMU, precum Arbiter Systems, Schneider Electric și SEL integrează în fiecare unitate produsă și comercializată câte un astfel de receptor GPS pentru sincronizarea timpului.

O soluție alternativă, mult mai accesibilă din punct de vedere economic ar putea fi utilizarea unui server NTP (*Network Time Protocol*) pentru un grup restrâns de echipamente comun care să livreze în timp real referința de timp necesară echipamentelor din acel grup.

În cadrul secțiunilor 2.4.1., 2.4.2., 2.4.3. și 2.4.4. din teza de doctorat, autorul îmbină studii aprofundate despre stadiul actual al soluțiilor de sincronizare a timpului folosind, fie protocolul NTP, fie protocolul PTPv2, comparându-le succesiv funcționalitățile și posibilitățile de integrare cu prototipul SMU, cu etapele practice efective de implementare a acestor principii în codul sursă a modulelor prototipului SMU.

Infrastructura de realizare a sincronizării referinței de timp a prototipului SMU este una tipică unei stive de comunicații în cadrul unui sistem de operare modular (de exemplu Linux), precum este ilustrat în figura 7 de mai jos.

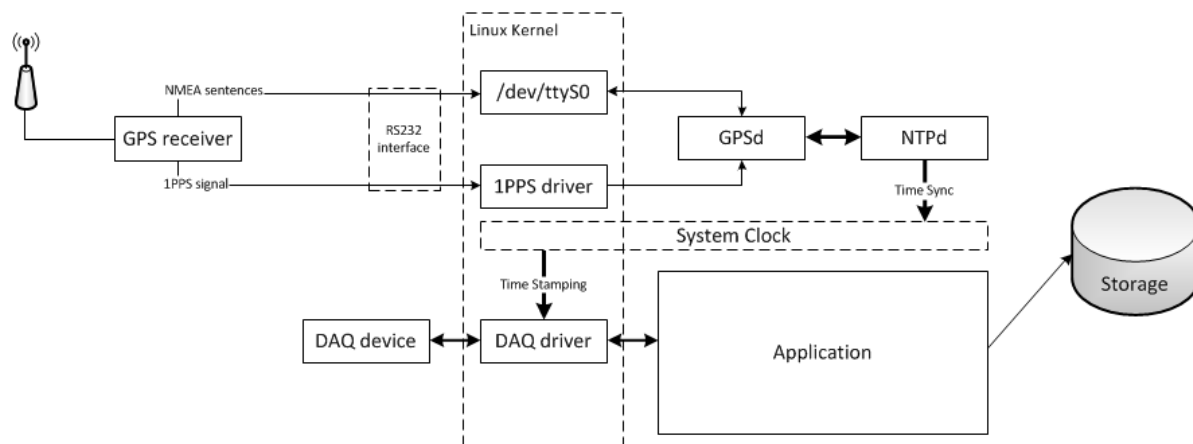


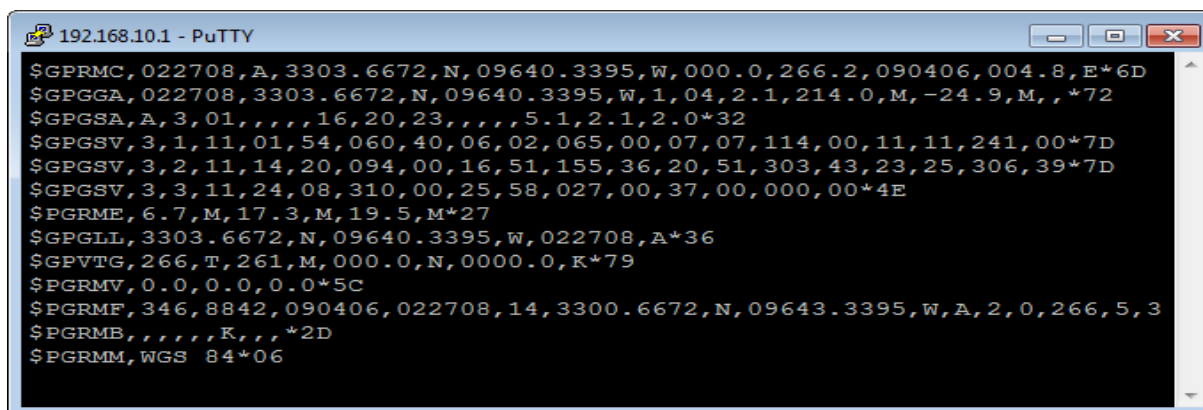
Figura 7. Arhitectura tipică a integrării unui receptor GPS într-un sistem Linux pentru sincronizarea ceasului intern (sursa: autorul)

Se poate observa în figura 7 că interfațarea între ceasul intern al sistemului SMU și receptorul GPS este realizată prin intermediul serviciului NTP local care comunică strâns cu driver-ul *GPSd* responsabil cu corelarea mesajelor NMEA primite de la GPS cu pulsurile 1PPS primite prin interfața RS232. Mesajele NMEA de tip \$GPGLL indică numărul secunde curente numărate de către receptorul GPS și transmise kernel-ului Linux prin intermediul GPSd și NTP, iar pulsurile 1PPS indică cu exactitate când începe și când se termină intervalul de timp al secunde curente. În final, întreaga suită de aplicații executate pe platforma kernel-ului astfel sincronizat (ca de exemplu: modulul de achiziție și cel de compresie) primesc în mod automat referința de timp corectă de la kernel.

În cazul unui grup de echipamente SMU, autorul propune în cadrul tezei desemnarea unui echipament comun responsabil cu obținerea unei mărci exacte de timp de la un receptor GPS, celelalte echipamente SMU nefiind conectate direct la receptor, ci obținând referința de timp prin protocolul NTP sau PTPv2, care, conform studiilor desfășurate în continuarea secțiunii 2.4.2. se completează unul pe celălalt, deoarece protocolul NTP furnizează echipamentelor "timpul corect", iar protocolul PTPv2 furnizează "același timp" tuturor echipamentelor, indiferent care ar fi acesta.

În secțiunea 2.4.4. a tezei, autorul descrie pas cu pas implementarea soluției de sincronizare a prototipului SMU cu referința de timp oferită de un receptor GPS prin intermediul componentei NTP, realizând astfel un așa-numit „NTP stratum-1”. Prototipul SMU dezvoltat de către autor este bazat pe o platformă Linux Embedded, pe suportul căreia este instalată și integrată componenta NTP, responsabilă cu sincronizarea ceasului intern al prototipului cu referința externă prin intermediul driver-urilor SHM, PPS și GPS_NMEA ilustrate în tabelul 4 din teză. În realizarea prototipului SMU este utilizat un modul GPS produs de către Quectel interconectat cu platforma prototipului prin interfața RS-232 [35].

Ansamblul terminalelor RXD, TXD, VCC și GND reprezintă interfața logică serială prin care receptorul GPS transmite linii de comandă de tip NMEA, precum cele ilustrate în figura 8, în care se poate observa că în mod normal receptorul GPS oferă întregul set de măsurători de poziție, timp, viteză și vizibilitate a sateliților conectați.



```
192.168.10.1 - PuTTY
$GPRMC,022708,A,3303.6672,N,09640.3395,W,000.0,266.2,090406,004.8,E*6D
$GPGLL,022708,3303.6672,N,09640.3395,W,1.04,2.1,214.0,M,-24.9,M,,*72
$GPGSA,A,3,01,,,,,16,20,23,,,,,5.1,2.1,2.0*32
$GPGSV,3,1,11,01,54,060,40,06,02,065,00,07,07,114,00,11,11,241,00*7D
$GPGSV,3,2,11,14,20,094,00,16,51,155,36,20,51,303,43,23,25,306,39*7D
$GPGSV,3,3,11,24,08,310,00,25,58,027,00,37,00,000,00*4E
$PGRME,6.7,M,17.3,M,19.5,M*27
$GPGLL,3303.6672,N,09640.3395,W,022708,A*36
$GPVTG,266,T,261,M,000.0,N,0000.0,K*79
$PGRMV,0.0,0.0,0.0*5C
$PGRMF,346,8842,090406,022708,14,3300.6672,N,09643.3395,W,A,2,0,266,5,3
$PGRMB,,,,,K,,,*2D
$PGRMM,WGS 84*06
```

Figura 8. Parametrii NMEA recepționați de prototipul SMU de la GPS
(sursa: [5])

Pentru scopul obținerii unei referințe de timp de înaltă acuratețe, parametrii de tip GPGLL, GPRMC, GPVTG, GPGLA, GPGLSA și GPGLSV au fost dezactivați din microcontroller-ul receptorului GPS, prin rularea următorului set de comenzi în interfață serială:

```
echo -n -e "$PMTK314,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0*29\r\n" > /dev/ttyS0
```

precum este ilustrat și în figura 9.

[illegible]

Figura 9. Modificarea parametrilor microcontroler-ului din cadrul receptorului GPS (sursa: autorul)

Scopul rulării acestei comenzi de modificare a parametrilor receptorului GPS este acela de a minimiza cantitatea de date transferată prin interfața serială, la fiecare iterație (o dată la fiecare secundă). Astfel scade semnificativ întârzierea produsă de transportul datelor. După cum se poate observa în figura 9, la finalul comenzii de tip \$PMTK314 este introdus numărul 29. Acesta reprezintă un hash de verificare a integrității comenzii transmise și este calculat cu ajutorul unui script ilustrat în figura 10.

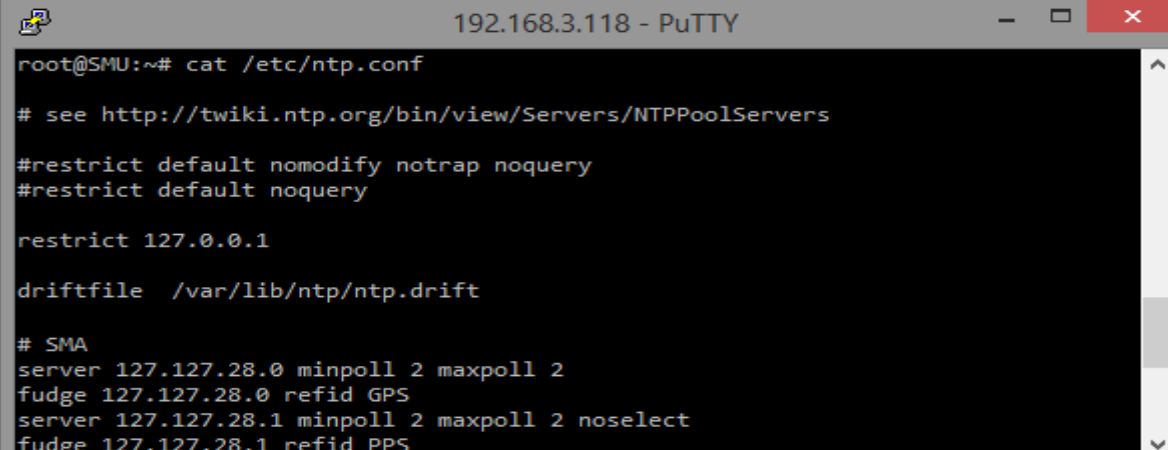
```
1 function updateChecksum(cmd) {
2     // Calculeaza hash prin XOR pe toate caracterele
3     var checksum = 0;
4     for(var i = 0; i < cmd.length; i++) {
5         checksum = checksum ^ cmd.charCodeAt(i);
6
7         // Converteste in hexa (baza 16, majuscule, grupul cel mai
8         // semnificativ primul)
9         var hexsum = Number(checksum).toString(16).toUpperCase();
10        if (hexsum.length < 2) {
11            hexsum = ("00" + hexsum).slice(-2);
12
13        return hexsum;
14    }
15 }
```

Figura 10. Codul sursă al funcției de calcul CRC pentru transmisia parametrilor de configurare ai receptorului GPS (sursa: autorul, adaptare după [30])

Ansamblul terminalelor DCD și GND, ce fac de asemenea parte din interfața fizică RS-232, aparțin însă unei alte interfețe din punct de vedere logic, ce asigură trenul de impulsuri PPS (*Pulse Per Second*), cele două interfețe fiind corelate pentru a realiza sincronizarea de

înalță precizie a ceasului intern al prototipului SMU cu referință externă oferită de receptorul GPS. În cazul implementării cu SHM (*Shared Memory*), cele două interfețe logice sunt listate în sistemul de operare Linux sub forma a unui singur fișier virtual în memoria RAM `/dev/shm`.

Această variantă de implementare presupune utilizarea atât a componentei GPSd, cât și a componentei dedicate sincronizării timpului NTPd, prima fiind cea responsabilă cu preluarea datelor din cele două interfețe logice și compunerea unei surse de semnal consolidate pentru NTP. Configurația NTP în cazul particular al prototipului SMU este ilustrată în figura 11.



```
root@SMU:~# cat /etc/ntp.conf
# see http://twiki.ntp.org/bin/view/Servers/NTPPoolServers
#restrict default nomodify notrap noquery
#restrict default noquery
restrict 127.0.0.1
driftfile /var/lib/ntp/ntp.drift

# SMA
server 127.127.28.0 minpoll 2 maxpoll 2
fudge 127.127.28.0 refid GPS
server 127.127.28.1 minpoll 2 maxpoll 2 noselect
fudge 127.127.28.1 refid PPS
```

Figura 11. Configurația componentei NTP din cadrul prototipului SMU
(sursa: autorul)

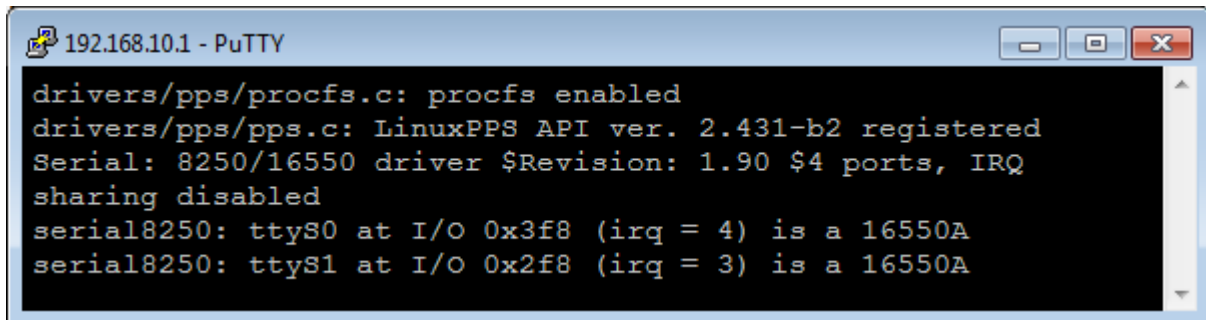
Se poate observa utilizarea unor pseudo-adrese IP de tip „127.127.X.Y” pentru a indica componentei NTP faptul că referința de timp este conectată local și nu accesibilă prin rețea. În notația „127.127.X.Y”, variabilele X și Y reprezintă următoarele:

- Variabila X reprezintă driver-ul folosit de NTP (conform listei din tabelul 4 din teză)
- Variabila Y reprezintă indexul interfeței reprezentate de driverul X

Acest mod de implementare cu ajutorul *Shared Memory* are avantajul că orice incompatibilitate dintre receptorul GPS și componenta NTP este rezolvată de către componenta intermediară GPSd.

A doua metodă de implementare GPS_NMEA și PPS tratează cele două interfețe logice în mod independent una față de cealaltă, obținându-se astfel două fluxuri de date pe care componenta NTP le interpretează separat, însă cu scopul comun de a asigura sincronizarea. Pentru aceasta este necesară existența unui modul dedicat în cadrul Kernel-ului Linux pentru a prelua corecturile impuse de componenta NTP și de a aplica „disciplina” temporală impusă de trenul de impulsuri PPS. Realizarea integrării acestui modul în Kernel-ul sistemului de operare Linux Embedded utilizat de autor în realizarea prototipului SMU, presupune recompilarea acestuia folosind parametrii `Config_Serial_8250`, `Config_PPS` și `Config_PPS_Client_8250`

Existenței driver-ului necesar recaptării trenului de impulsuri PPS după recompilare este verificată folosind comanda `dmesg | grep "pps" | "8250"` ilustrată în figura 12 și în figura 13.

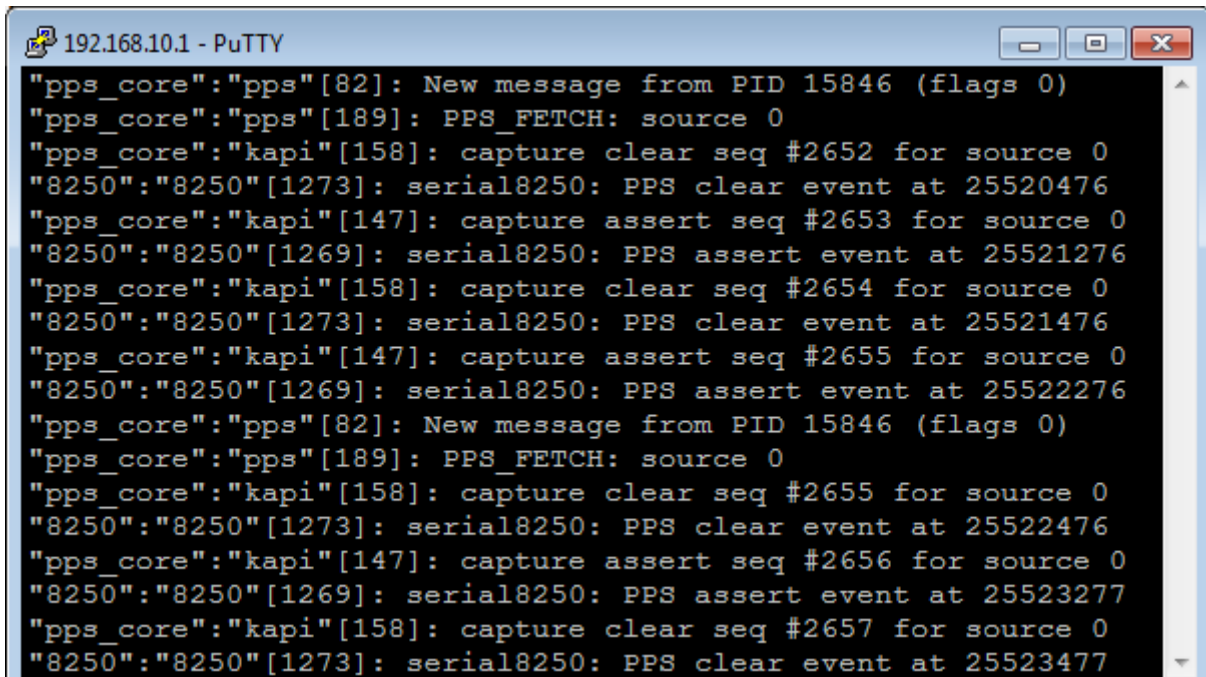


```

192.168.10.1 - PuTTY
drivers/pps/procfs.c: procfs enabled
drivers/pps/pps.c: LinuxPPS API ver. 2.431-b2 registered
Serial: 8250/16550 driver $Revision: 1.90 $4 ports, IRQ
sharing disabled
serial8250: ttyS0 at I/O 0x3f8 (irq = 4) is a 16550A
serial8250: ttyS1 at I/O 0x2f8 (irq = 3) is a 16550A

```

Figura 12. Statusul modulului de Kernel responsabil cu PPS (sursa: [5])



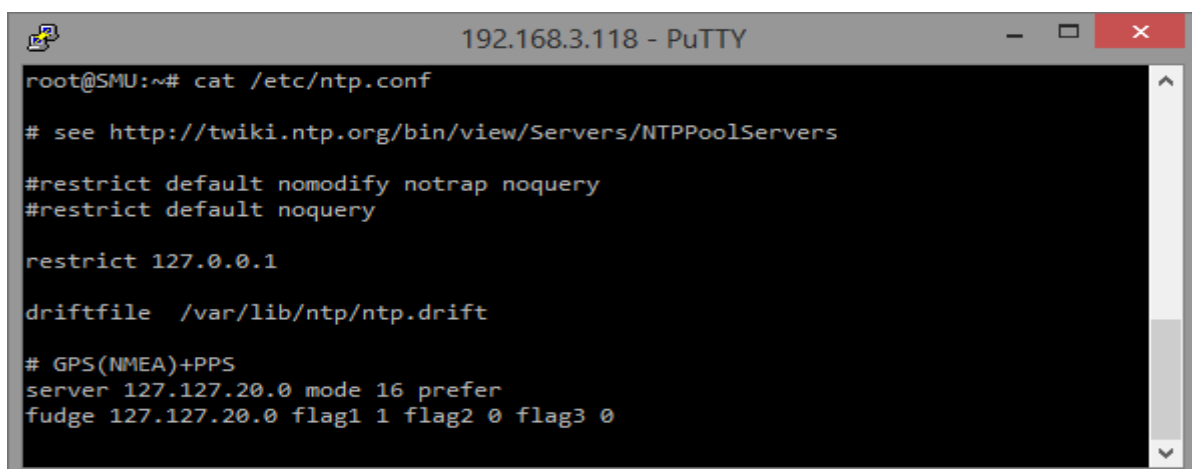
```

192.168.10.1 - PuTTY
"pps_core":"pps"[82]: New message from PID 15846 (flags 0)
"pps_core":"pps"[189]: PPS_FETCH: source 0
"pps_core":"kapi"[158]: capture clear seq #2652 for source 0
"8250":"8250"[1273]: serial8250: PPS clear event at 25520476
"pps_core":"kapi"[147]: capture assert seq #2653 for source 0
"8250":"8250"[1269]: serial8250: PPS assert event at 25521276
"pps_core":"kapi"[158]: capture clear seq #2654 for source 0
"8250":"8250"[1273]: serial8250: PPS clear event at 25521476
"pps_core":"kapi"[147]: capture assert seq #2655 for source 0
"8250":"8250"[1269]: serial8250: PPS assert event at 25522276
"pps_core":"pps"[82]: New message from PID 15846 (flags 0)
"pps_core":"pps"[189]: PPS_FETCH: source 0
"pps_core":"kapi"[158]: capture clear seq #2655 for source 0
"8250":"8250"[1273]: serial8250: PPS clear event at 25522476
"pps_core":"kapi"[147]: capture assert seq #2656 for source 0
"8250":"8250"[1269]: serial8250: PPS assert event at 25523277
"pps_core":"kapi"[158]: capture clear seq #2657 for source 0
"8250":"8250"[1273]: serial8250: PPS clear event at 25523477

```

Figura 13. Evenimentele generate de trenul de impulsuri PPS (sursa: [5])

În urma validării faptului ca modulul PPS este funcțional (conform testelor prezentate anterior) componenta NTP din cadrul prototipului SMU este configurată să comunice cu ambele interfețe logice (conform fișierului de configurare scris de autor și ilustrat în figura 14)



```

192.168.3.118 - PuTTY
root@SMU:~# cat /etc/ntp.conf
# see http://twiki.ntp.org/bin/view/Servers/NTPPoolServers
#restrict default nomodify notrap noquery
#restrict default noquery
restrict 127.0.0.1
driftfile /var/lib/ntp/ntp.drift
# GPS(NMEA)+PPS
server 127.127.20.0 mode 16 prefer
fudge 127.127.20.0 flag1 1 flag2 0 flag3 0

```

Figura 14. Parametrii de configurare NTP pentru GPS_NMEA și PPS
(sursa: autorul)

În cursul pașilor de implementare a sincronizării referinței de timp a prototipului SMU cu cea dată de receptorul GPS, problema survenită este de compatibilitate dintre consola clasică Linux, asociată din timpul secvenței de boot pe portul serial /dev/ttyS0 și modul de transmisie a parametrilor NMEA de către receptorul GPS, realizat tot prin /dev/ttyS0. Conflictul astfel creat prin alocarea portului /dev/ttyS0 către consola Linux împiedică instrucțiunile NMEA să fie preluate de componenta NTP în scopul obținerii referinței exacte de timp. Aceasta a fost înlăturată de către autor prin modificarea parametrului `console=tty0` și `console=ttyS0,38400n8` din secvența de boot a Kernel-ului.

2.5. Stocarea datelor în prototipul SMU

Prin intermediul echipamentului SMU, ca și prototip hibrid între conceptele de PMU și data-logger, se dorește studiul/monitorizarea fenomenelor electrice în anumite noduri ale „smart grid”-ului unde instabilitatea este ridicată sau șansele de apariție a fenomenelor nedorite în rețeaua energetică sunt sporite. De aceea, echipamentul SMU însuși trebuie să aibă o construcție robustă a componentei software și, astfel, o maximă toleranță la fenomenele de instabilitate (de exemplu: căderi repetate de tensiune, supra-tensiuni, fluctuații ale frecvenței, sau alte perturbații ale sinusoidelor normale ale tensiunii și curentului) din acel nod.

În această secțiune este descrisă organizarea, construcția și implementarea efectivă a componentei software a echipamentului SMU, care, în afară de funcționarea optimă echipamentului în condițiile mai sus enumerate, deservește și la gestiunea datelor măsurate (verificare, retransmitere după caz, suprascriere și ștergere a datelor vechi și confirmate, etc.)

Stocarea definitivă a datelor măsurate (mai exact, a înregistrărilor la rezoluție înaltă a formelor de undă a semnalelor electrice) din nodul de rețea considerat este realizată în final de către PDC (nodul de colectare a tuturor acestor înregistrări, inclusiv de la celelalte echipamente SMU). Echipamentul SMU însuși deține un rol important prin stocarea provizorie a datelor în memoria sa locală. Când se vorbește despre transmiterea în timp real a unor seturi uriașe de date printr-o rețea publică cum este Internetul, atunci trebuie luată în considerare noțiunea de „*bottleneck*”¹ cauzată de vitezele instabile (uneori mari, alteori insuficiente și cu un tipar necunoscut) prin această rețea², precum este ilustrat în figura 15:

¹ Preluată din limba engleză, această noțiune se referă la fenomenul de „gâtuire” a unui sistem într-unul sau mai multe puncte ale sale, ceea ce cauzează de cele mai multe ori o diminuare considerabilă a performanțelor, fie computaționale, fie de transfer sau returnare a datelor.

² Mai multe despre aceste aspecte și soluțiile studiate și propuse de autor sunt descrise în capitolul 2.6.3 din teză

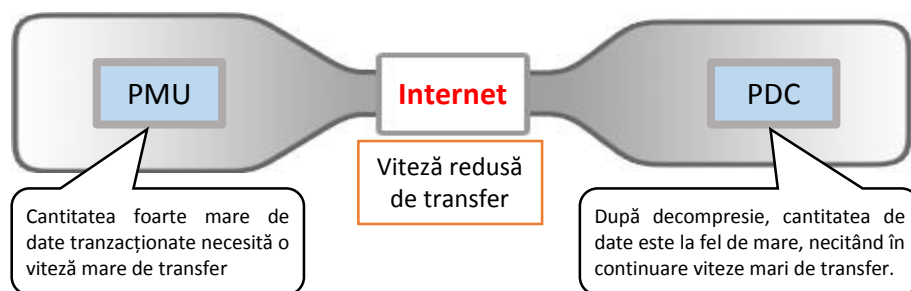


Figura 15. Problema bottleneck-ului, în cazul sistemelor cu flux mare de date.
(sursa: autorul)

Logica modului prototip pentru gestiunea memoriei (ca parte componentă din sistemul *embedded* construit de autor) este de asemenea prezentată în această secțiune a tezei. Deoarece volumul de date este unul mare, iar memoria limitată, echipamentul SMU decide când sunt șterse și suprascrise datele din memoria provizorie. Această secțiune din cadrul tezei scoate în evidență acei factorii în funcție de care modulul de gestiune a memoriei din cadrul SMU-ului decide dacă datele pot fi suprascrise sau nu.

Spre deosebire de modul de stocare al PMU-urilor studiate până în prezent de autor, prototipul SMU deține o memorie cu capacitate mult mai mare (de ordinul a 250 ~ 500 GB) sub forma unor „hard-disk”-uri configurate în RAID¹, pe suportul cărora echipamentul SMU stochează provizoriu datele (mai exact, înregistrările la înaltă rezoluție a formelor de undă a tensiunilor și curenților), care deși au fost transmise către PDC, aceste mai sunt încă stocate temporar cu scopul de a le re-transmite, dacă PDC-ul nu confirmă primirea acestora.

Odată confirmată recepția corectă a datelor de către PDC, modulul de gestiune a memoriei din componența software-ului *embedded* al echipamentului SMU marchează segmentul respectiv de date ca fiind eligibil pentru suprascriere când memoria de stocare a SMU-ului ajunge aproape de limită.

În prima parte a acestui capitol este descrisă construcția software-ului *embedded* a echipamentului SMU, vital pentru funcționarea și gestiunea acestuia în condițiile enunțate la pagina anterioară. Această construcție a fost realizată de către autor pe o platformă cu arhitectură x86 pornind de la sistemul de operare Linux OpenWRT versiunea 12.09 [33]. Datorită caracterului orientat spre proces și execuție în timp real, sistemele de operare *embedded* bazate pe versiuni de Linux sunt cele preferate de majoritatea producătorilor de echipamente industriale de măsură, control și comandă. În această categorie și încadrează și echipamentele PMU utilizate în prezent în componența rețelelor WAMPAC. Producători precum Schneider Electric și General Electric preferă variante modificate de Linux pentru

¹ Termenul RAID provine din limba engleză „*redundant array of inexpensive disks*” și se referă la un concept de redundanță al scrierii datelor pe hard-disk-uri cu scopul de a evita pierderile de date cauzate de căderile de tensiune electrică.

integrare cu procesoarele DSP cu care își echipează PMU-urile. Pe de altă parte Arbitter Systems integrează un sistem de operare proprietar în modelul lor 113, despre care în prezent nu există documentație oficială.

Prototipul echipamentului SMU este construit pe o platformă SBC (din engleză: *Single Board Computer*) AAEON PFM-540I format PC/104 cu procesor AMD Geode LV800 de arhitectură x86 și cu modul de memorie „NAND flash” de tip Compact Flash Tip 1 (figura 16) și interfațat cu un modul de comunicație Ethernet (Intel 82551xER 10/100 MBit) pe magistrala PCI, unul de comunicație Wireless IEEE IEEE 802.11 a/b/g/n (Atheros) pe magistrala serială, un receptor GPS/GLONASS (Quectel) pe magistrala RS232 cu semnal 1PPS în timp real și o placă de sunet (Maya 44) cu 6 canale de intrare sincrone pe magistrala serială.

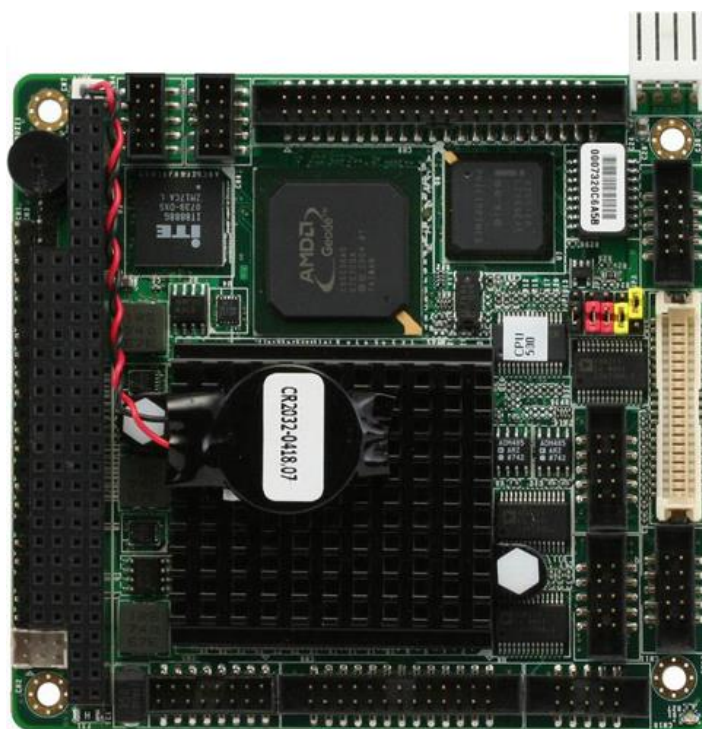


Figura 16. Modulul SBC (single board computer) utilizat pentru prototipul SMU
(sursa: <http://www.aaeonusa.com/download/datasheet/PFM-540I-RevB.pdf>)

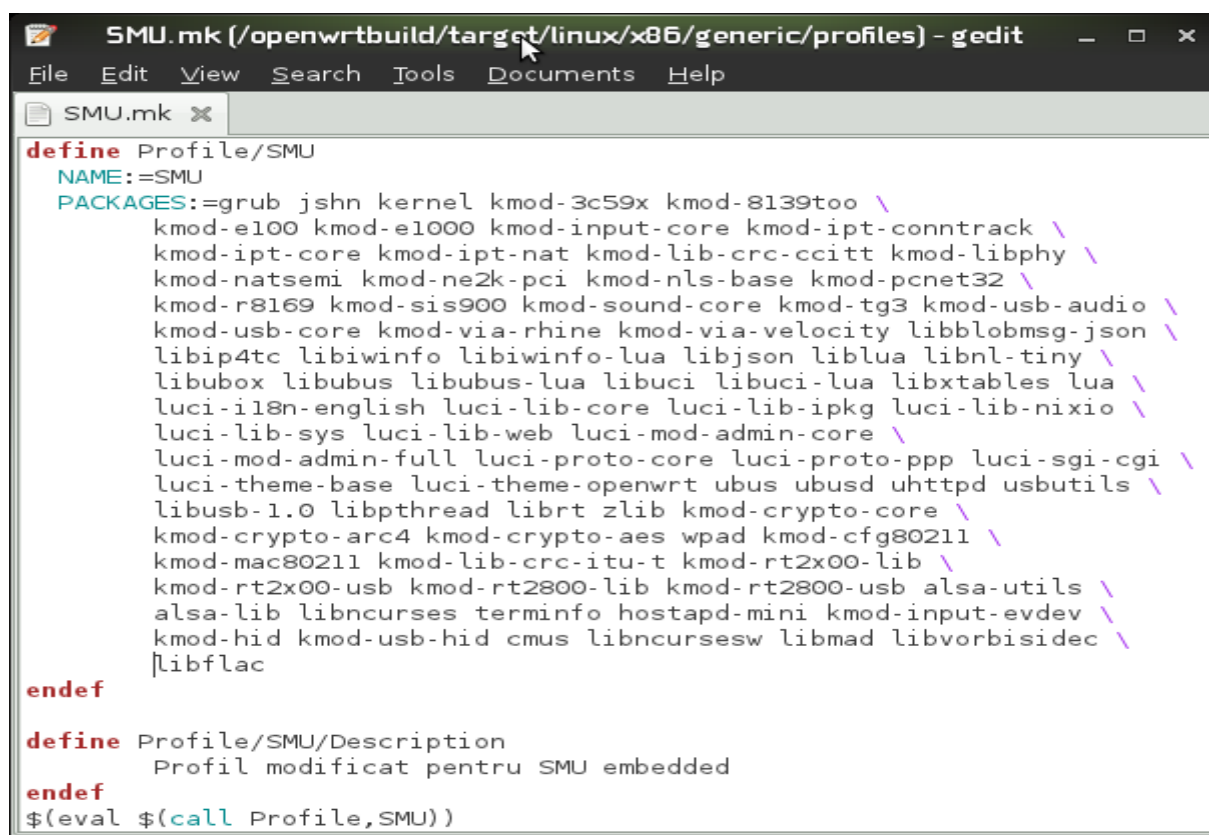
Spre deosebire de metoda aleasă de autor pentru construcția prototipului SMU, National Instruments oferă, de exemplu, platforme dedicate de dezvoltare a software-ului embedded pentru controllerele lor de tip CompactRIO [32] bazate pe tehnologie FPGA. Această metodă implică însă costuri ridicate, incomparabil mai mari decât cele ce reies din abordarea propusă de autorul acestei teze, bazată pe *embedded Linux*.

În secțiunea 2.5.2. a tezei, autorul detaliază construcția sistemul de operare embedded folosit la realizarea prototipului SMU, care este stocat în trei secțiuni ale memoriei CF:

- Zona „*read-only*” similară cu o memorie PROM, programată / compilată conform procedurilor descrise în secțiunea 2.5.3. a tezei

- Zona cu stocare permanentă, folosită de către sistemul embedded la memorarea parametrilor de configurare, precum adresele IP pentru comunicație, parametrii conexiunilor Wireless, date de autentificare la rețea, pachetul de configurare primit de la PDC aferent parametrilor electrici ce trebuie luați în considerare la achiziția datelor.
- Zona cu stocare temporară, ce se suprapune peste structura memoriei „read-only”, însă nu contribuie la stocarea propriu-zisă a datelor, ci joacă doar rol de tampon în transmiterea pachetelor IP în rețea

Profilul utilizat în compilarea sistemului Linux embedded și generarea primelor două zone de stocare pentru prototipul SMU este ilustrat în figura 17. Se pot distinge aici: definirea listei de module dependente, a numelui de referință și a funcției de evaluare.



```

define Profile/SMU
  NAME:=SMU
  PACKAGES:=grub jshn kernel kmod-3c59x kmod-8139too \
    kmod-e100 kmod-e1000 kmod-input-core kmod-ipt-contrack \
    kmod-ipt-core kmod-ipt-nat kmod-lib-crc-ccitt kmod-libphy \
    kmod-natsemi kmod-ne2k-pci kmod-nls-base kmod-pcnet32 \
    kmod-r8169 kmod-sis900 kmod-sound-core kmod-tg3 kmod-usb-audio \
    kmod-usb-core kmod-via-rhine kmod-via-velocity libblobmsg-json \
    libip4tc libiwinfo libiwinfo-lua libjson liblua libnl-tiny \
    libubox libubus libubus-lua libuci libuci-lua libxtables lua \
    luci-i18n-english luci-lib-core luci-lib-ipkg luci-lib-nixio \
    luci-lib-sys luci-lib-web luci-mod-admin-core \
    luci-mod-admin-full luci-proto-core luci-proto-ppp luci-sgi-cgi \
    luci-theme-base luci-theme-openwrt ubus ubusd uhttpd usbutils \
    libusb-1.0 libpthread librt zlib kmod-crypto-core \
    kmod-crypto-arc4 kmod-crypto-aes wpad kmod-cfg80211 \
    kmod-mac80211 kmod-lib-crc-itu-t kmod-rt2x00-lib \
    kmod-rt2x00-usb kmod-rt2800-lib kmod-rt2800-usb alsa-utils \
    alsa-lib libncurses terminfo hostapd-mini kmod-input-evdev \
    kmod-hid kmod-usb-hid cmus libncursesw libmad libvorbisidec \
    libflac
endef

define Profile/SMU/Description
  Profil modificat pentru SMU embedded
endef

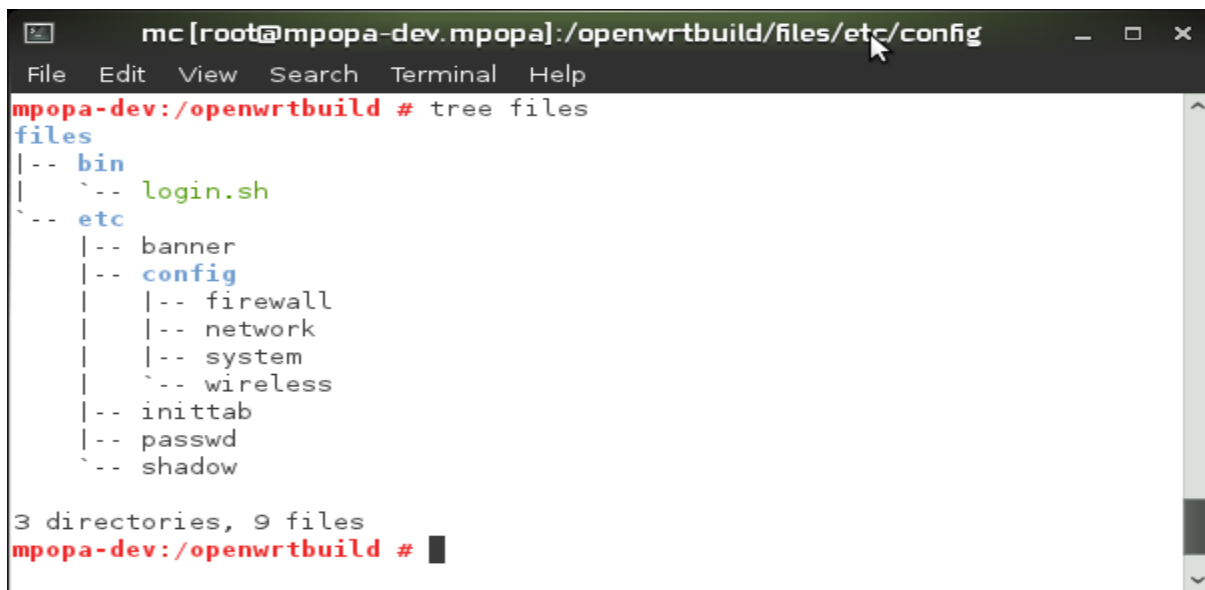
$(eval $(call Profile,SMU))
  
```

Figura 17. Definiția profilului de compilare a sistemului de operare embedded pentru platforma SBC utilizată la prototipul SMU (sursa: autorul)

Lista completă a tuturor modulelor incluse în procesul de compilare a imaginii memoriei read-only a sistemului embedded este prezentată în tabelul 6 al tezei de doctorat. Unele dintre grupele de module menționate au scopul de *debugging*, respectiv de depanare a eventualelor probleme din timpul testelor și sunt folosite exclusiv pe perioada pilotului. De aceea, aceste grupe pot fi excluse atunci când se face o compilare definitivă și în scopuri productive.

Ultimul pas efectuat de autor înainte de compilarea propriu-zisă a imaginii memoriei „read-only” din cadrul prototipului SMU este definirea listei de fișiere implicite de configurare. În directorul codului sursă autorul definește o librărie a acestor fișiere, iar referințele către

acestea sunt apoi utilizate în cadrul procesului de compilare. Structura acestor fișiere implicite este reprezentată în figura 18.

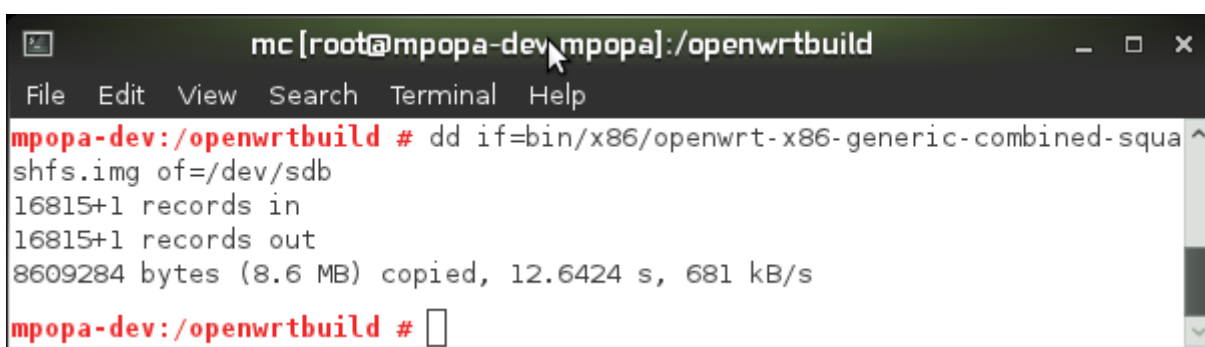


```
mc [root@mpopa-dev.mpopa]:/openwrtbuild/files/etc/config
File Edit View Search Terminal Help
mpopa-dev:/openwrtbuild # tree files
files
|-- bin
|   |-- login.sh
|-- etc
|   |-- banner
|   |-- config
|   |   |-- firewall
|   |   |-- network
|   |   |-- system
|   |   |-- wireless
|   |-- inittab
|   |-- passwd
|   |-- shadow
3 directories, 9 files
mpopa-dev:/openwrtbuild #
```

Figura 18. Structura fișierelor implicite de configurare
ce sunt compilate în memoria read-only (sursa: autorul)

Imaginea binară a zonei de memorie „read-only” este în final comprimată cu algoritmul LZMA rezultând o partiție de tip „*SquashFS*” de mărime totală de 8MB, autorul folosind sintaxa: `make image PROFILE=SMU PACKAGES="-dnsmasq -ppp -ppp-mod-pppoe -kmod-ipt-nathelper" FILES=files/`

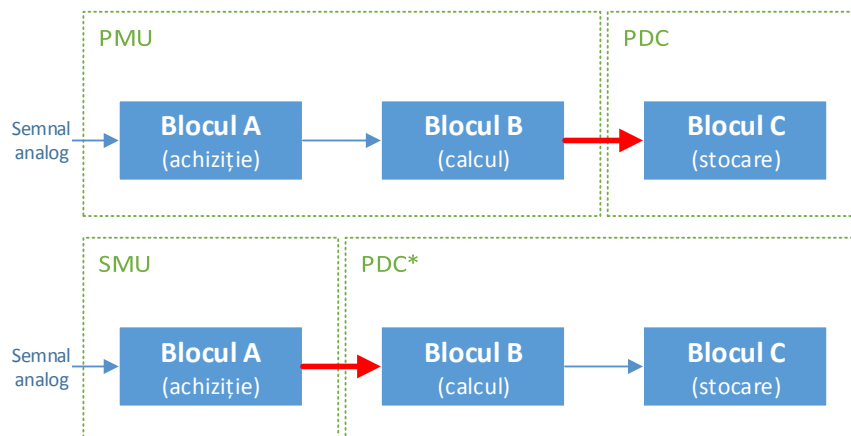
Cele două faze de construcție a imaginii declanșate în urma comenzii de mai sus sunt detaliate în cadrul tezei de doctorat în secțiunea 2.5.3., iar în final imaginea binară a sistemului embedded este scrisă la nivel fizic pe suportul de memorie Compact Flash, autorul folosind comanda `dd if=openwrt-generic-x86- of=/dev/sdb` precum este ilustrat și în figura 19.



```
mc [root@mpopa-dev.mpopa]:/openwrtbuild
File Edit View Search Terminal Help
mpopa-dev:/openwrtbuild # dd if=bin/x86/openwrt-x86-generic-combined-squa
shfs.img of=/dev/sdb
16815+1 records in
16815+1 records out
8609284 bytes (8.6 MB) copied, 12.6424 s, 681 kB/s
mpopa-dev:/openwrtbuild #
```

Figura 19. Rezultatul compilării imaginii embedded (sursa: autorul)

Conform celor prezentate în capitolul 2.2.1 din teză, una dintre principalele diferențe între echipamentele PMU și SMU este translația punctului de transfer al datelor din succesiunea blocurilor A, B și C, în cazul echipamentului SMU așa cum este reprezentat în figura 20.

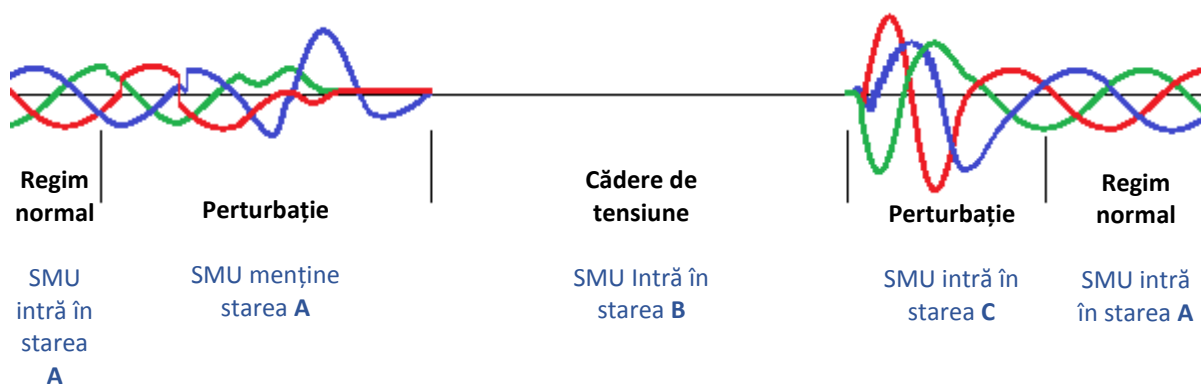


**Figura 20. Modificarea punctului unde intervine
transmisia datelor / diferența între PMU (sus) și PMU (jos) (sursa: autorul)**

Această translație atrage după sine creșterea cantității de date ce trebuie transportată între echipamentul SMU și PDC, ce implică de asemenea și o gestiune mai atentă a transportului acestor date, deoarece riscul de apariție a inconsistențelor (sau corupțiilor logice) crește direct proporțional cu cantitatea de date transferate. Prin urmare, se naște necesitatea ca echipamentul SMU să poată stoca datele măsurate pentru o perioadă mai lungă după ce acestea au fost transmise către PDC, cu scopul de a le putea re-transmite în cazul în care PDC-ul nu a putut recepționa datele în întregime.

A doua consecință a translației reprezentată în figura 20 și care reiese din necesitatea de a stoca măsurătorile pe o perioadă mai îndelungată, este faptul că mediul de stocare ce asigură această retenție trebuie să fie protejat împotriva căderilor de tensiune din nodul de rețea unde amplasat echipamentul SMU, printr-un algoritm care minimizează operațiunile de scriere pe acest mediu, împreună cu modul hardware micro-UPS cu acumulatori de 75W.

În capitolul 2.5.4 al tezei este prezentat prototipul modulului de gestiune a memoriei de stocare a datelor măsurate, integrat în sistemul embedded construit de autor. Acesta implementează o logică simplă de activare, respectiv, dezactivare a anumitor funcții/componente din structura echipamentului SMU, în funcție de stările în care acesta se află, succesiunea lor fiind reprezentată în figura 21.



**Figura 21. Succesiunea acțiunilor întreprinse de modulul de gestiune a memoriei,
pentru a asigura atingerea scopului prezentat în continuare (sursa: autorul)**

Rezultă în final o diagramă a stărilor reprezentată de către autor în figura 22, în care sunt ilustrate tranzițiile și condițiile acestora de trecere dintr-o stare în alta.

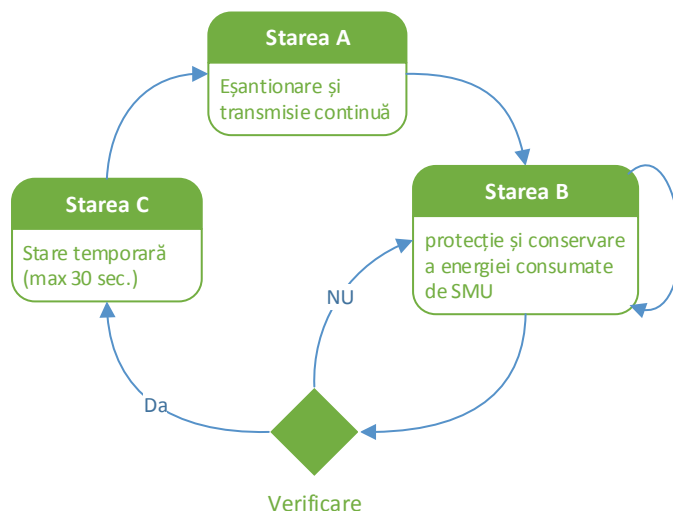


Figura 22. Diagrama de stare a modului de gestiune din componenta echipamentului SMU (sursa: autorul)

Starea **C** (starea tranzitorie) este o fază intermediară între starea B și starea A, în care modulul de gestiune rămâne pe o perioadă scurtă (aprox. 30 de secunde). Această stare se aseamănă mult cu starea A, fiind diferită doar prin faptul că stocarea eșantioanelor de înregistrări achiziționate pe perioada când tensiunea electrică a revenit se realizează temporar pe suportul de memorie Compact Flash, urmând a fi transferate definitiv pe hard-disk când modulul intră din nou în starea A. (figura 22)

Scopul algoritmului propus de autor constă în maximizarea cantității de înregistrări ale formelor de undă, în ciuda căderii de tensiune la care este supus echipamentul SMU; garantarea faptului că formele de undă aferente momentului de revenire a tensiunii sunt de asemenea înregistrate; minimizarea necesarului de energie consumată din UPS, cât timp tensiunea electrică din nodul respectiv de rețea este căzută și garantarea stocării și transmiterii durabile după revenirea tensiunii electrice a formelor de undă înregistrate pe perioadă căderii de tensiune.

Studiile și testele desfășurate de autor în cadrul acestei cercetări, precum și observațiile descrise de autor în capitolele precedente sunt unice în momentul de față în literatură, deoarece nici un sistem integrat de măsurare/achiziție de date din domeniul Ingineriei Electrice nu deține această logică de gestiune a datelor măsurate, transmitere și confirmare a pachetelor și nici nu oferă acest raport între gradul de funcționalitate (comparabil de altfel cu cel al unui calculator complet) și gradul de toleranță la instabilitățile din rețeaua unde este amplasat cu scopul de monitorizare.

2.6. Transmiterea în timp real a datelor realizată de prototipul SMU

Transmisia datelor este un punct important în instrumentația de mare precizie. În domeniul ingineriei electrice și, mai exact, în studiul „smart grid”-urilor, unde măsurarea parametrilor trebuie să se realizeze simultan în cât mai multe noduri pentru o evaluare exactă a stării rețelei, este necesar ca datele achiziționate de la echipamentele amplasate în acele noduri cheie ale rețelei să fie livrate în timp real. Această cerință impune utilizarea unui protocol de comunicații adecvat naturii datelor transportate. De exemplu, în cazul rețelelor WAMPAC, unde PMU-urile reprezintă elementul primar de obținere a datelor, a fost dezvoltat protocolul C37.118 ale cărui specificații sunt definite de standardul cu același nume [15].

Studiile [11, 19, 16] din ultimii ani asupra rețelelor WAMPAC au identificat și optimizat transportul măsurătorilor prin intermediul acestui protocol. Ultima versiune a standardului C37.118.2 publicată în anul 2011 [15] prevede ușoare modificări în arhitectura pachetelor de date pentru a corespunde noilor cerințe de securitate și integritate a datelor, însă atunci când se pune problema transportului unui volum mai mare de date în timp real (precum cel al formelor de undă propriu-zise), standardul menționat anterior, respectiv protocolul acestuia își pierde compatibilitatea cu noile cerințe prezentate în secțiunile 2.6.1 și 2.6.2 din teză.

În prezent, accentul în monitorizarea rețelelor electroenergetice, prin intermediul sistemelor WAMS și WAMPAC, este pus atât pe determinarea exactă a unghiului de fază instantaneu și al frecvenței instantanee (ca derivată a unghiului de fază în raport cu timpul) de către PMU-uri dispuse strategic pe barele rețelei, cât și pe livrarea rezultatelor acestor calcule în cel mai scurt timp la centrele de colectare a datelor, reprezentate prin unitățile PDC. [1, 2]

Integrarea dintre protocolul C37.118 și standardul IEC61850-90-5 se realizează pe mai multe nivele din cadrul modelului OSI¹ și este ilustrată mai departe în figura 23.

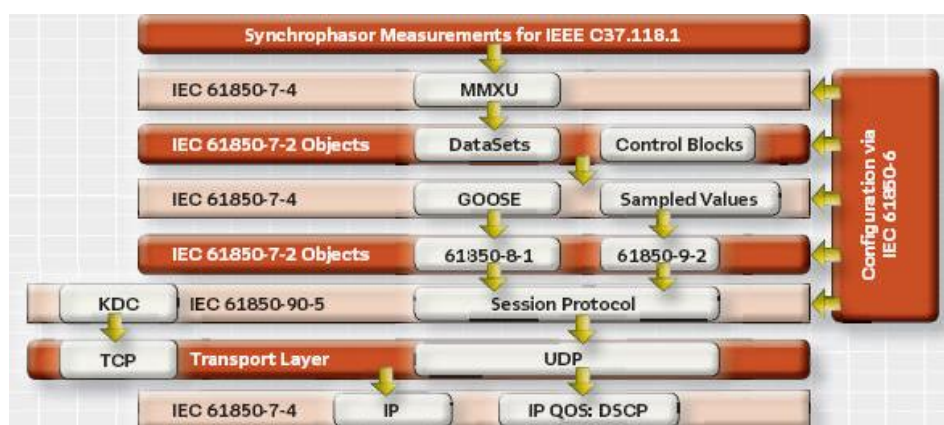


Figura 23. Integrarea între C37.118 și IEC61850-90-5 (sursa: [31])

¹ Precum a fost discutat în secțiunea 1.2. din teză (la pagina 7), modelul OSI ajută la implementarea comunicației între două sau mai multe entități de rețea, încapsulând pachete dintr-o clasă în pachete dintr-o clasă diferită cu scopul de a asigura compatibilitatea datelor.

Literatura actuală, în care sunt descrise inițiative de implementare a unor rețele WAMPAC de studiu, precum [18, 13, 22, 7], amintește de asemenea de lipsa unei criptări a acestor pachete, structura acestora internă fiind vizibilă oricărui observator arbitrar plasat pe una sau mai multe linii de comunicații de date și capabil să realizeze interceptarea acestora.

Pe baza datelor furnizate de PMU-uri, sunt implementați algoritmi la un nivel centralizat pentru estimarea stării rețelei electroenergetice monitorizate, pe baza cărora se încearcă crearea unui grad de observabilitate suficient de ridicat, astfel încât deciziile asupra rețelei electroenergetice (fie manuale, fie automatizate) să poată fi luate cunoscând în totalitate situația fiecărui nod de amplasare a PMU-urilor. Estimarea realizată astfel este sensibilă la calitatea datelor oferite de PMU-uri, existând riscuri majore ca rezultatele estimării și, implicit, deciziile luate să fie eronate, dacă transmisia datelor de PMU-uri a fost ținta unor atacuri cibernetice cu sau fără injectare de date false.

Unii producători folosesc protocoale deschise (de exemplu: IEEE C37.118, IEC 61850-90-5, IEEE 1344), în timp ce alții implementează protocoale proprii (F-NET, SEL Fast Message, Macrodyne și BPA PDCstream), ale căror documentații sunt inaccesibile (sau parțial accesibile) publicului, sperând că astfel minimizează riscul de injecție a datelor false.

În final, pentru studiul în amănunt al unui eveniment nedorit în rețea se ajunge de cele mai multe ori la analiza fiecărui detaliu al formei de undă din momentul evenimentului și din perioadele premergătoare ale acestuia. Producătorii soluțiilor actuale de monitorizare propun în prezent sincro-fazorii determinați de echipamentele lor, drept elemente de reconstrucție a formei de undă inițiale, acest mod de abordare fiind limitat la numărul de cadre pe secundă pe care îi poate susține echipamentul și vulnerabil la pierderile de pe liniile de telecomunicații.

Această metodă de reconstrucție a formelor de undă inițiale prezintă dezavantajele că forma de undă astfel generată este limitată la numărul de cadre pe secundă cu care echipamentul PMU calculează fazorii¹ și că, în condițiile în care un cadru dintre cele încapsulate de PMU-uri în pachete TCP/IP sau UDP nu poate fi transmis, există riscul ca reconstrucția formei de undă inițiale să fie imposibilă².

Pe de altă parte, transmisia formei de undă în întregime sa, în mod comprimat ca un singur pachet TCP/IP ce conține o perioadă întreagă a semnalului, prezintă avantajul că toate eșantioanele formei de undă sunt transmise împreună, eliminând în totalitate riscul ca semnalul să nu fie complet; că rata de eșantionare poate fi setată pe o valoare de 44 KHz,

¹În prezent, echipamentele studiate de autor pot oferi un maxim de 50 de cadre pe secundă, ceea ce echivalează cu o rată de eșantionare foarte scăzută.

² Această problemă a fost des întâlnită la comunicațiile dintre PMU-urile și PDC-ul testat în cadrul MicroDERLab, atât prin protocolul UDP cât și prin TCP

independentă de rata de transmisie a pachetelor de date prin rețeaua de comunicație și că odată ajuns pachetul de date la PDC, întreaga formă de undă este identică cu cea originală.

Această schimbare de abordare în transmisia datelor atrage după sine schimbarea naturii pachetelor de date ce trebuie transportate. Așadar, cantitatea de informație ce trebuie transmisă în timp real crește semnificativ, născându-se astfel necesitatea de a comprima datele după principii moderne inspirate din domenii adiacente ingineriei electrice, precum telecomunicațiile și telefonía VoIP unde se folosesc conceptele de *codec* (Comprimare - Decomprimare).

În urma studiilor amănunțite asupra soluțiilor moderne din telecomunicații pentru compresia semnalelor în timp real, realizate de autor și descrise detaliat în cadrul secțiunilor 2.6.3.2 și 2.6.3.3 din teză, autorul propune unul dintre cei mai performanți algoritmi de compresie existenți în prezent în acest domeniu drept soluție de integrare cu natura semnalelor existente pe barele rețelelor electroenergetice. Dezvoltat sub licență open-source, codec-ul *FLAC* (din limba engleză: *Free Lossless Audio Codec*) este cel ales de către autor ținând cont de următoarele aspecte:

- Capacitatea codec-ului de a realiza rate de compresii înalte fără pierderi de date (aceasta înseamnă că forma de undă rezultată după compresia și decompresia semnalului cu acest codec este identică cu forma de undă inițială); de aici rezultă și sintagma *lossless* din denumirea acestui codec;
- Timpul și resursele de calcul (de exemplu: număr de registre în procesor, cantitate de memorie RAM utilizată, număr de cicluri mașină implicate) necesare compresiei și decompresiei sunt scăzute, ceea ce indică faptul că algoritmul de compresie este bine optimizat;
- Integrabilitate ridicată cu celelalte module din componența prototipului SMU pentru o dezvoltarea software unificată;
- Posibilitate de căutare după marca timpului (*timestamp seeking*) în formatul deja comprimat, ceea ce îl face util în retransmiterea unor anumite secvențe de date ce nu au putut fi transmise datorită unor diverse probleme temporare de conectivitate.

Integrarea acestui codec în prototipul SMU a fost realizată de autor cu ajutorul librăriilor open-source: *gststreamer*, *libgststreamer*, *libgrtsp*, *libgstinterfaces*, *libgstnetbuffer*, *libgstdataprotocol*, *libgstcontroller*, *gst-mod-flac*, *gst-mod-alsa*, *gst-mod-tcp*, *gst-mod-tls*, implementate sub licență GPL (General Public License) pe diverse platforme Linux, inclusiv pe cea embedded OpenWRT.

Abordarea implementării folosind librării open-source contribuie semnificativ la reducerea costurilor de dezvoltare a platformei, oferind de asemenea o vastă aplicabilitate în cazul altor tipuri de semnale voluminoase ce necesită transmisie în timp real. Integrate în sistemul de operare Linux OpenWRT, librăriile open-source GStreamer enumerate anterior

formează baza de dezvoltare a multor soluții existente în prezent în Internet pentru conversie, streaming, editare și analiză de fluxuri media, deoarece pune la dispoziția programatorului un *framework* complex compus din codec-uri, elemente de interfațare, filtre, surse/destinații și magistrale de comunicații (precum este ilustrat în figura 24)

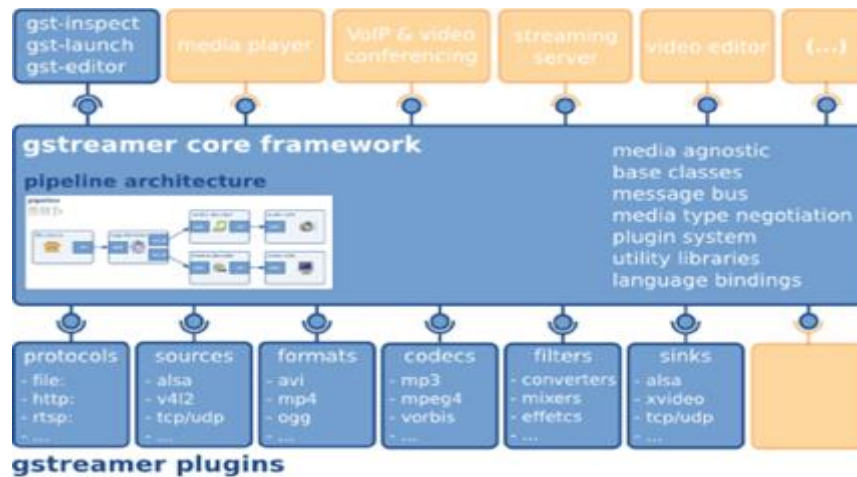


Figura 24. Reprezentare grafică a librărilor GStreamer
utilizate în dezvoltarea modului de transmisie a prototipului SMU
(sursa: [28])

Modulul software principal al prototipului SMU reprezentat în figura 25. Ca prim pas al aplicației, se definesc trei obiecte principale: evenimentul aferent conexiunii („*on_pad_added*”) care este apelat când interfața (*pad*-ul) blocului se conectează; magistrala ce interconectează toate modulele (denumită în terminologia GStreamer ca și *pipeline*), notată în cod cu numele „bus” (de tip *GstBus*) și bucla principală de control a magistralei, inițializată prin „*loop = g_main_loop_new (NULL, FALSE)*”.

```

1  #include <gstreamer-0.10/gst/gst.h>
2  #include <glib-2.0/glib.h>
3
4
5  static gboolean
6  bus_call (GstBus      *bus,
7           GstMessage *msg,
8           gpointer     data)
9  {
10     {...29 lines...}
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40  static void
41  on_pad_added (GstElement *element,
42              GstPad      *pad,
43              gpointer     data)
44  {
45      GstPad *sinkpad;
46      GstElement *decoder = (GstElement *) data;
47
48      /* We can now link this pad with the vorbis-decoder sink pad */
49      g_print ("Dynamic pad created, linking demuxer/decoder\n");
50  }

```

```

51     sinkpad = gst_element_get_static_pad (decoder, "sink");
52
53     gst_pad_link (pad, sinkpad);
54
55     gst_object_unref (sinkpad);
56 }
57
58 int
59 main (int  argc,
60       char *argv[])
61 {
62     GMainLoop *loop;
63
64     GstElement *pipeline, *source, *demuxer, *decoder, *conv, *sink;
65     GstBus *bus;
66     guint bus_watch_id;
67
68     /* Initialisation */
69     gst_init (&argc, &argv);
70
71     loop = g_main_loop_new (NULL, FALSE);
72
73
74     /* Check input arguments */
75     if (argc != 2) {

```

bus_call

Figura 25. Modulul principal al modului de transmisie
în timp real al prototipului SMU (sursa: autorul)

După compilarea modului pilot ilustrat anterior, rezultatul execuției este returnat în consola principală (figura 26).

```

mc [root@mpopa-dev.mpopa]:/home/mp/Documents
mpopa-dev:/home/mp/Documents # ssh root@192.168.3.118
root@192.168.3.118's password:
BusyBox v1.19.4 built-in shell (ash)
#####
Prototip SMU pentru aplicatie in domeniul Inginerie Elctrica
(masurarea, achizitia, stocarea si transmitia in timp real
a formelor de unda din nodul de retea energetica considerat)
Prototip bazat pe OpenWRT linux 12.09
#####
root@SMU:~# gst-launch -e -v alsasrc ! audio/x-raw-int, endianness=(int)
1234", signed=(boolean)true", rate=(int)16000", channels=(int)4", widt
h=(int)8", depth=(int)8" ! queue ! audiorate ! flacenc ! filesink locat
ion=test.flac
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0: actual-buffer-time = 191812
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0: actual-latency-time = 21312
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0.GstPad:src: caps = audio/x-raw
-int, endianness=(int)1234, signed=(boolean)true, rate=(int)16000, channe
ls=(int)4, width=(int)8, depth=(int)8
Pipeline is live and does not need PREROLL ...
New clock: GstAudioSrcClock
/GstPipeline:pipeline0/GstCapsFilter:capsfilter0.GstPad:src: caps = audio

```

```

/x-raw-int, endianness=(int)1234, signed=(boolean>true, rate=(int)16000,
channels=(int)4, width=(int)8, depth=(int)8
/GstPipeline:pipeline0/GstFlacEnc:flacenc0.GstPad:src: caps = audio/x-fla
c, channels=(int)4, rate=(int)16000
/GstPipeline:pipeline0/GstFlacEnc:flacenc0.GstPad:sink: caps = audio/x-ra
w-int, endianness=(int)1234, signed=(boolean>true, rate=(int)16000, chann
els=(int)4, channels=(int)4, rate=(int)16000
/GstPipeline:pipeline0/GstFileSink:filesink0.GstPad:sink: caps = audio/x-
flac, channels=(int)4, rate=(int)16000, streamheader=(buffer)< 7f464c4143
010000002664c614300000002212001200000000000000003e8067000000000000000000
000000000000000000000000, 840000282000000007265666572656e6365206c6962464c414320
312e322e3120323030373039313700000000 >
EOS on shutdown enabled -- Forcing EOS on the pipeline
Waiting for EOS...
Got EOS from element "pipeline0".
EOS received - stopping pipeline...
Execution ended after 2918615937 ns.
Setting pipeline to PAUSED ...
/GstPipeline:pipeline0/GstFileSink:filesink0.GstPad:sink: caps = NULL
/GstPipeline:pipeline0/GstFlacEnc:flacenc0.GstPad:src: caps = NULL
/GstPipeline:pipeline0/GstAudioRate:audiorate0.GstPad:sink: caps = NULL
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0.GstPad:src: caps = NULL

```

Figura 26. Rezultatul execuției modului principal de transmisie din cadrul prototipului SMU (sursa: autorul)

Modulul principal de transmisie a datelor comprimate din componența prototipului SMU, al cărui rezultat de execuție este ilustrat în figura 26, este dezvoltat de către autorul acestei teze programatic în limbajul C++ folosind librăriile GStreamer. Pe de altă parte, aceste librării au fost folosite și individual pentru scopuri de depanare și validare a codului dezvoltat. Aceste operații sunt executate prin intermediul executabilului `gst-launch` pre-compilat, pus la dispoziție de către librăriile GStreamer special pentru acest scop. Ulterior, modulele astfel testate sunt concatenate folosind simbolul „!” (semnul de exclamare)

De exemplu, sintaxa ilustrată în figura 26 reprezintă o concatenare a modului primar de achiziție a semnalelor cu cel secundar de output al semnalului achiziționat.

```
gst-launch alsasrc ! audio/x-raw-int,rate=22000,channels=4,width=16
```

Modului secundar de achiziție este cel care îl controlează pe cel primar, din punct de vedere al parametrilor de achiziție, precum rata de eșantionare, numărul de canale simultane și lățimea de canal în biți. Acești parametri nu sunt cei folosiți la compresie, ci au efect doar la nivelul achiziției brute a semnalului. În urma setării acestor parametri, modulul primar de achiziție intră într-o buclă de eșantionare pentru a asigura faptul că nu sunt pierdute eșantioane din semnalul original, livrând valorile eșantionate și cuantificate direct în memoria RAM a sistemului SMU prin acces DMA (*Direct Memory Access*).

Capitolul 3

***Pilot pentru testarea și simularea
prototipului SMU***

Acest capitol prezintă funcționarea în cadrul infrastructurii pilot a prototipului SMU dezvoltat de autor, precum și rezultatele experimentale ale soluțiilor propuse de autor pe baza tehnologiilor integrate în acest prototip. Datorită caracterului multi-disciplinar al prototipului SMU, etapele pilotului sunt prezentate ierarhic, pornind inițial de la fazele macroscopice ale funcțiunilor spre detalii tehnice împrumutate parțial și din alte domenii tehnice conexe ingineriei electrice, pentru a studia comparativ rezultatele componentelor din prototipul SMU cu cele utilizate în prezent la scară mondială în rețelele WAMPAC. De asemenea sunt oferite detalii de natură operațională asupra realizării prototipului și testării graduale a modulelor acestuia pe măsură ce acestea au fost dezvoltate și integrate în ansamblul prototipului.

În cele din urmă este realizată și o scurtă evaluare din punct de vedere economic a costurilor de dezvoltare și implementare experimentală a pilotului, ținând cont de scenariile de utilizare, precum și de beneficiile aduse de o posibilă integrare a pilotului în micro-rețeaua WAMPAC experimentală utilizată în cadrul testelor. Componenta, configurabilitatea și, implicit, flexibilitatea, precum și beneficiile unei astfel de abordării oferite de această micro-rețea WAMPAC a fost de asemenea prezentată de autor în cadrul lucrării [6], nepublicată încă la momentul redactării acestei teze, însă acceptată spre prezentare în cadrul conferinței AMPS 2014, a cărei publicație este indexată ISI.

3.1. Mediul de test al micro-infrastructurii WAMPAC

Pentru studiul comportamentului prototipului SMU dezvoltat de autorul acestei teze, au fost implementate două medii de test paralele:

- Primul mediu folosit pentru testare este unul folosit în mod curent și este bazat pe standardele și protocoalele actuale C37.118 și IEC61850-90-5. Acesta constă într-un număr de 5 echipamente PMU fizice instalate în mod dinamic¹ în puncte cheie ale unei substații din rețeaua națională electroenergetică și interconectate din punct de

¹ Caracterul dinamic al instalării acestor echipamente PMU este dat de faptul că interconectarea la rețeaua energetică, precum și cea la rețeaua de transmisie de date și configurarea PMU-ului pentru fiecare nouă instalare se realizează într-un timp semnificativ scurtat față de rețelele clasice WAMS și prezintă o programabilitate și flexibilitate ridicată.

vederea al transportului de date cu un sistem openPDC instalat pe suportul unei mașini virtuale (ale cărei detalii sunt ilustrate în figura 27) în locația centrală din UPB (EB105).

```

Hyper-V Module: Virtual Machine 'PDC'

PS C:\> (Get-VM)[0] | fl

Name                : PDC(win8.1)
State                : Running
CpuUsage             : 1
MemoryAssigned       : 1579155456
MemoryDemand         : 1326448640
MemoryStatus         : OK
Uptime               : 1.15:37:19
Status               : Operating normally
ReplicationState     : Disabled
Generation           : 1

PS C:\> (Get-VM)[0] | Get-VMbios | fl

ComputerName        : VMHOST2
NumLockEnabled      : False
StartupOrder        : {CD, IDE, LegacyNetworkAdapter, Floppy}
VMId                : 330528af-afab-48c6-8c92-fbae01cf85a7
VMName              : PDC(win8.1)
VMSnapshotId        : 00000000-0000-0000-0000-000000000000
VMSnapshotName      :
Key                 :
IsDeleted            : False

PS C:\> (Get-VM)[0] | Get-VMmemory

VMName      DynamicMemoryEnabled Minimum(M) Startup(M) Maximum(M)
-----
PDC(win8.1) True                512        2048      2048

PS C:\>

```

Figura 27. Infrastructura sistemului virtual openPDC
(sursa: autorul)

Infrastructura acestui prim mediu de testare comparativă a prototipului constă în primul rând, într-un substrat virtual de comunicație de tipul unei rețele VPN (din engleză: *Virtual Private Network*) prin intermediul rețelei publice a Internetului, între zonele teritoriale de amplasare a echipamentelor PMU și locația centrală din cadrul UPB unde este amplasat PDC-ul. Această infrastructură VPN este ilustrată în figura 28.

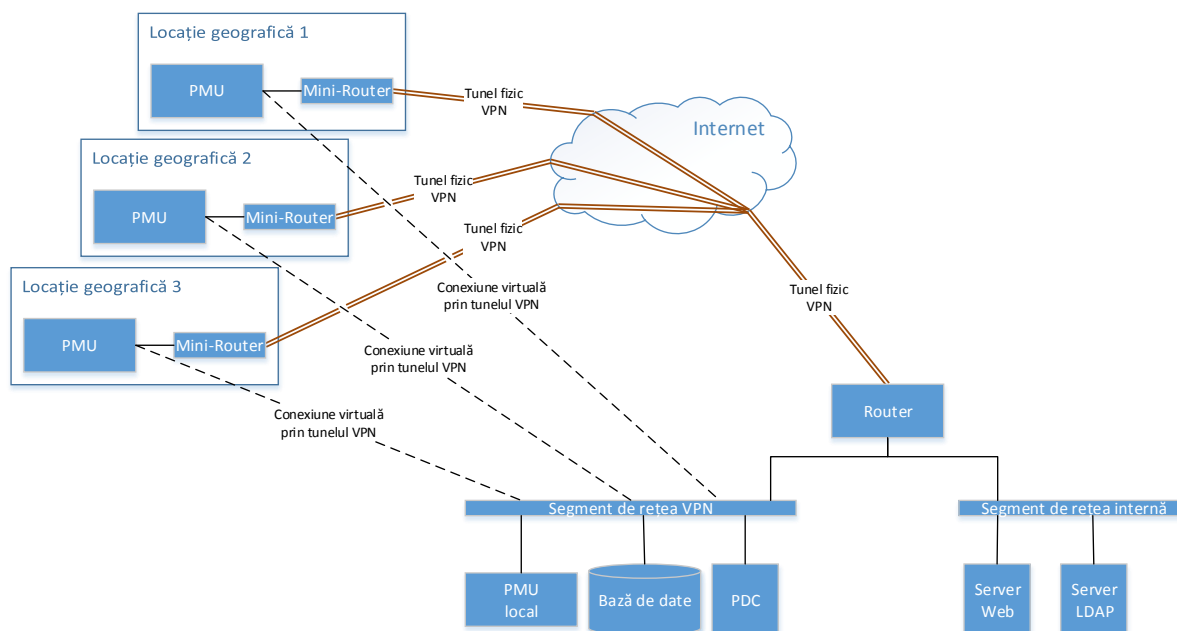


Figura 28. Infrastructura de comunicații de date
a mediului de testare pentru prototipul SMU (sursa: autorul)

Necesitatea integrării soluției VPN apare ca urmare a naturii protocolului C37.118, conform celor prezentate în capitolul 1.2.2. de la pagina 13 din teză, în care PMU-ul (conform implementărilor actuale) joacă rol de server din punct de vedere TCP/IP.

Deși nu este o soluție durabilă¹, utilizarea VPN-ului reprezintă singura posibilitate de a interconecta cu PDC-ul unul sau mai multe PMU-uri localizate în rețelele interne (de cele mai multe ori protejate conform principiilor moderne de securitate prezentate în secțiunea 1.2.2.2 din teză) ale operatorilor de distribuție a energiei electrice.

- Cel de-al doilea mediu de test este de asemenea unul mixt (ce constă în echipamente fizice și virtuale). În componența acestuia intră prototipul SMU propriu-zis, un calculator cu rol de generator de semnale de test pe care rulează o aplicație minimală dezvoltată de autor în limbajul de programare LabView și o mașină virtuală cu rol de receptor al stream-ului în timp real al formelor de undă transmise de prototipul SMU. Infrastructura acestui mediu de teste este ilustrată în figura 29, în care se poate identifica faptul că într-o primă fază a pilotului, prototipul SMU nu achiziționează semnalele electrice direct de pe barele rețelei electroenergetice, ci mai întâi (cu scop experimental) preia semnalele analogice simulate de către un generator de semnal, ca și când acestea ar proveni din rețeaua electroenergetică.

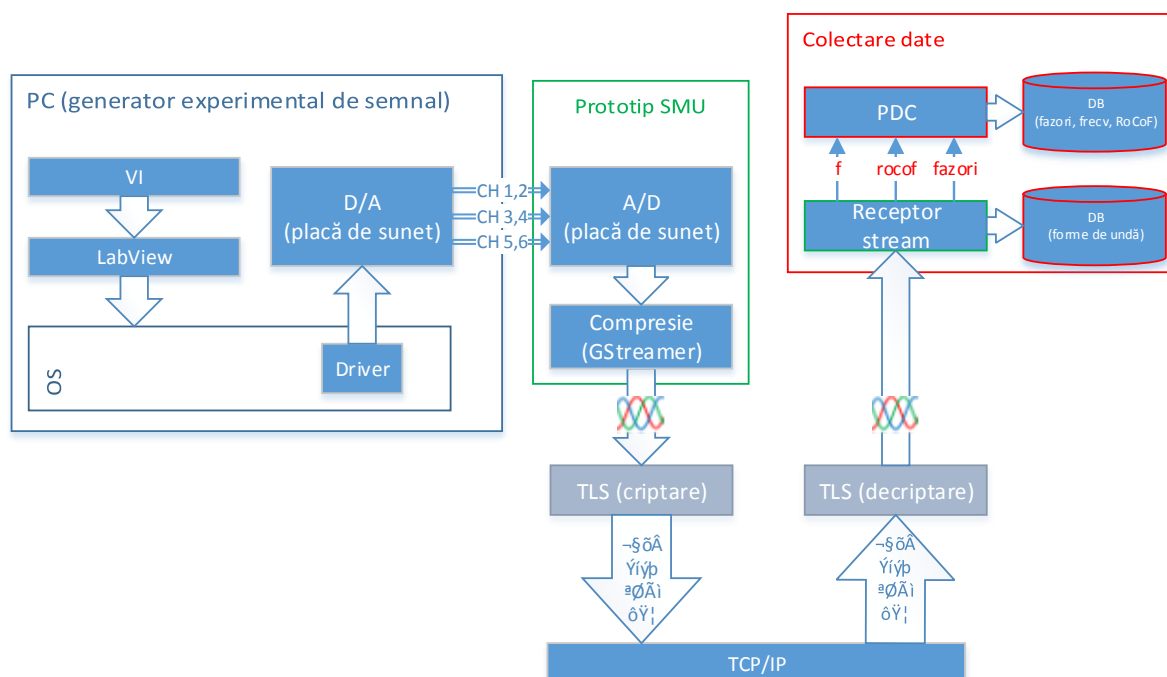


Figura 29. Infrastructura pilot de testare a funcționalităților prototipului SMU (sursa: autorul)

¹ Afirmația ca VPN-ul nu este o soluție durabilă în acest context, se bazează pe faptul că pachetele TCP/IP transmise de PMU trebuie trecute printr-un nivel suplimentar de procesare (criptare, decriptare, segmentare, etc.) efectuat de soluția VPN utilizată, ceea ce introduce întârzieri suplimentare în transmiterea dorită a fi „în timp real”.

Elementele încadrate cu culoarea verde (prototipul SMU cu toate subcomponentele sale și receptorul stream-ului formelor de undă comprimate) reprezintă obiectul studiului prezentat în cadrul acestei teze de doctorat și testat în cadrul acestui pilor, iar cele încadrate cu culoare roșie fac subiectul unor cercetări ulterioare propuse autor pentru integrarea cu sistemele PDC actuale. Elementul de generare de semnal, reprezentat în partea stângă a diagramei din figura 29, are scopul de experimentare a achiziției de date și este construit de autor cu caracter temporar pe platforma unui calculator personal de birou cu platforma LabView instalată.

În urma implementării acestui modul de generare de semnal și simulare de perturbații aleatoare, la ieșirea din convertorul digital/analog (realizat în cadrul prezentului pilor printr-o placă de sunet), autorul obține semnalele ilustrate în figura 30 pe care le utilizează la testarea și validarea comportamentală a prototipului SMU, obținând rezultatele prezentate în secțiunea 3.2. a tezei de doctorat și prezentate succint în acest rezumat.

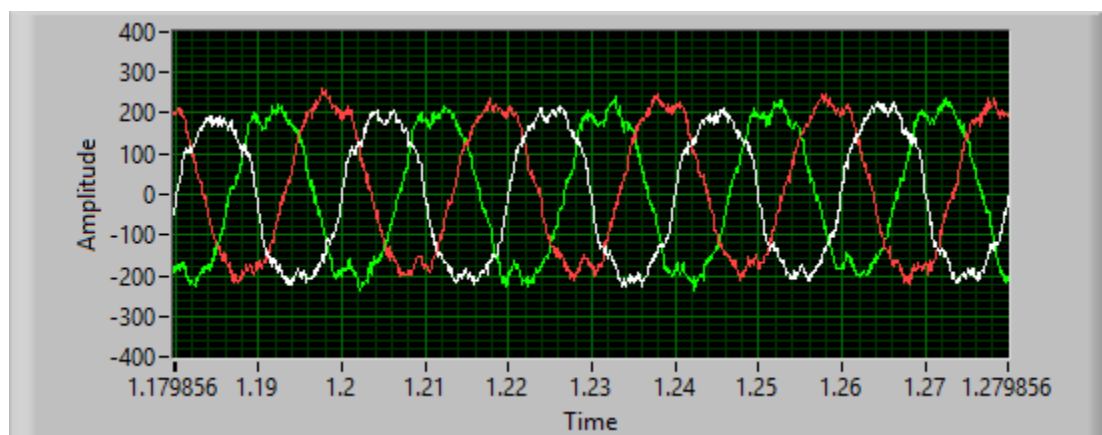


Figura 30. Semnalul generat de modulul dezvoltat de autor în cadrul pilotului
(sursa: autorul)

Aplicând acest semnal la intrarea modulului de achiziție a prototipului și inițializând procedurile de test cu ajutorul librăriilor GStreamer, a căror integrare, structură și funcționalitate a fost detaliată în secțiunea 2.6.3 din teză, autorul a obținut rezultatele prezentate în continuare. Aceste rezultate au fost de asemenea evaluate din punctele de vedere ale criteriilor și cerințelor dezbătute în secțiunea 2.6.1, precum și prin comparație cu micro-rețeaua WAMPAC dezvoltată cu scop experimental, parțial în laboratorul Micro DER Lab și cu surse de date distribuite geografic în diverse noduri ale rețelei naționale electroenergetice.

În faza post-pilot, acest modul temporar de generare de semnal va fi înlocuit cu un modul fizic (constând în echipamente electronice intermediare de măsură digitală a tensiunilor și curenților tari, precum amplificatoare cu separație sau transformatoare de măsură) pentru interconectarea prototipului SMU la bara propriu-zisă a segmentului de rețea electroenergetică considerată pentru experimentare.

3.2. Primele rezultate ale pilotului

Acest capitol descrie în detaliu subrutinele efectuate de modulele software ale prototipului SMU pentru realizarea transmisiei de date în timp real conform soluției propuse de autor în capitolele anterioare. Aici se disting trei situații ale inter-operării dintre module:

- Achiziția semnalului pentru stocarea temporară pe suportul de memorie nevolatil al prototipului SMU. Aceasta este realizată de către autor prin comanda:

```
gst-launch -e -v alsasrc ! audio/x-raw-int, endianness="(int)1234",
signed="(boolean)true", rate="(int)16000", channels="(int)4",
width="(int)8", depth="(int)8" ! queue ! audiorate ! flacenc ! filesink
location=test.flac
```

Se observă utilizarea elementului „*queue*” cu scopul de a constitui o memorie tampon pentru procesul de scriere pe suportul de memorie, unde lățimea de bandă și, implicit, viteza de acces este mai mică decât cea de achiziție. Rezultatele acestei rutine de test sunt ilustrate în figura 31.

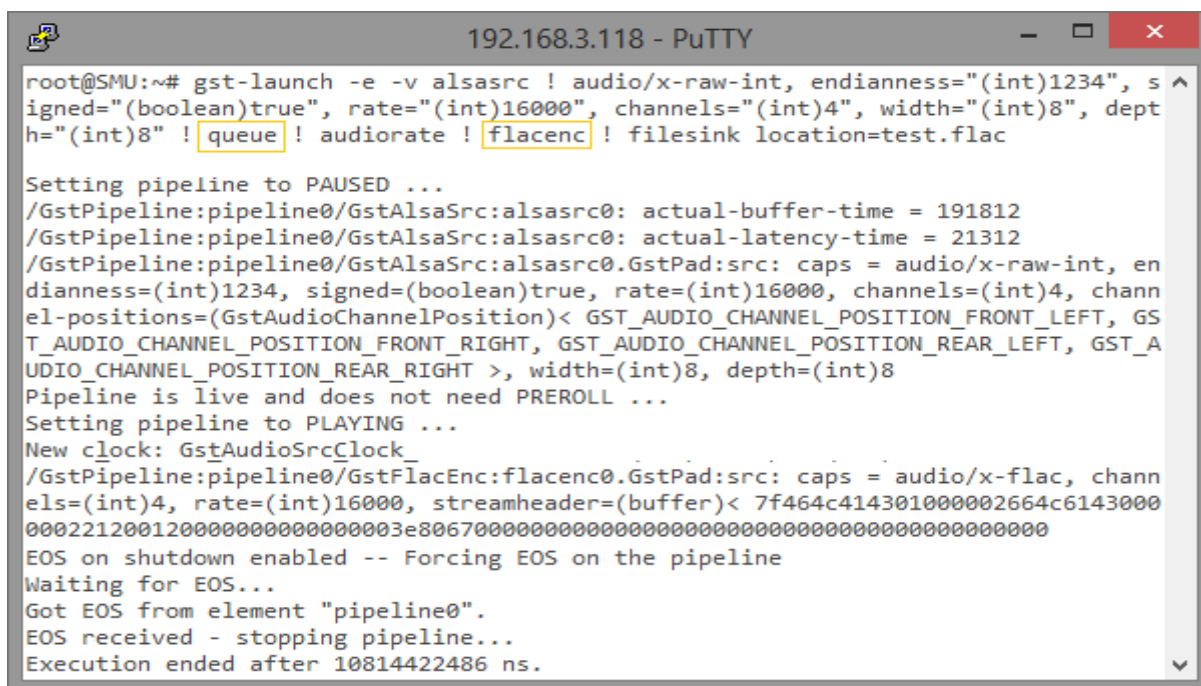


Figura 31. Rezultatele rutinei de stocare temporară a formelor de undă (sursa: autorul, utilizând librăriile GStreamer)

- Achiziția semnalului pentru stocarea temporară sub forma mai multor fișiere distribuite pe suportul de memorie nevolatil al prototipului SMU. Aceasta este realizată de către autor prin comanda:

```
gst-launch -e -v alsasrc ! audio/x-raw-int, endianness="(int)1234",
signed="(boolean)true", rate="(int)16000", channels="(int)4",
width="(int)8", depth="(int)8" ! queue ! audiorate ! flacenc ! multifilesink
location=rec%05d.flac next-file=1
```

Rezultatul acestei rutine este de asemenea ilustrat în continuare în figura 32:

```

root@SMU:~# gst-launch -e -v alsasrc ! audio/x-raw-int, endianness="(int)1234", signed="(boolean)true", rate="(int)16000", channels="(int)4", width="(int)8", depth="(int)8" ! queue ! audiorate ! flacenc ! multifilesink location=rec%05d.flac next-file=1

Setting pipeline to PAUSED ...
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0: actual-buffer-time = 191812
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0: actual-latency-time = 21312
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0.GstPad:src: caps = audio/x-raw-int, endianness=(int)1234, signed=(boolean)true, rate=(int)16000, channels=(int)4, channel-positions=(GstAudioChannelPosition)< GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_RIGHT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_RIGHT >, width=(int)8, depth=(int)8
Pipeline is live and does not need PREROLL ...
Setting pipeline to PLAYING ...
New clock: GstAudioSrcClock
/GstPipeline:pipeline0/GstCapsFilter:capsfilter0.GstPad:src: caps = audio/x-raw-int, endianness=(int)1234, signed=(boolean)true, rate=(int)16000, channels=(int)4, channel-positions=(GstAudioChannelPosition)< GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_RIGHT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_RIGHT >, width=(int)8, depth=(int)8
/GstPipeline:pipeline0/GstCapsFilter:capsfilter0.GstPad:sink: caps = audio/x-raw-int, endianness=(int)1234, signed=(boolean)true, rate=(int)16000, channels=(int)4, channel-positions=(GstAudioChannelPosition)< GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_RIGHT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_RIGHT >, width=(int)8, depth=(int)8
/GstPipeline:pipeline0/GstQueue:queue0.GstPad:sink: caps = audio/x-raw-int, endianness=(int)1234, signed=(boolean)true, rate=(int)16000, channels=(int)4, channel-positions=(GstAudioChannelPosition)< GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_RIGHT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_LEFT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_RIGHT >, width=(int)8, depth=(int)8
/GstPipeline:pipeline0/GstMultiFileSink:multifilesink0.GstPad:sink: caps = audio/x-flac, channels=(int)4, rate=(int)16000, streamheader=(buffer)< 7f464c414301000002664c61430000002212001200000000000000003e80670000000000000000000000000000000000, 840000282000000007265666572656e63655206c6962464c414320312e322e3120323030373039313700000000 >

EOS on shutdown enabled -- Forcing EOS on the pipeline
Waiting for EOS...
Got EOS from element "pipeline0".
EOS received - stopping pipeline...
Execution ended after 67985202930 ns.

```

Figura 32. Rezultatele rutinei de stocare temporară a formelor de undă distribuită pe mai multe fișiere (sursa: autorul, utilizând librăriile GStreamer)

- Achiziția semnalului atât pentru stocarea intermediară pe suportul de memorie nevolatilă, cât și pentru transmisia în timp real către receptorul formelor de undă prin intermediul protocolului TCP/IP. Cele două rutine sunt executate concomitent, datorită integrării modulului „fork”, respectiv „fork.”, prin care aplicația dezvoltată inițializează două *thread*¹-uri de procesare paralele. Această rutină este testată cu ajutorul comenzii de mai jos:

¹ Noțiunea de *thread* este folosită în domeniul ingineriei calculatoarelor pentru a defini un și neîntrerupt de operații în cadrul unei subrutine din procesorul unui echipament de calcul. Capacitatea procesoarelor moderne de a executa mai multe astfel de șiruri cu scopul de a eficientiza utilizarea resurselor interne este referențiată deseori sub numele de *multi-threading*.

```
gst-launch -e -v alsasrc ! audio/x-raw-int, endianness="(int)1234",
signed="(boolean)true", rate="(int)16000", channels="(int)4",
width="(int)8", depth="(int)8" ! queue ! audiorate ! flacenc ! tee name=fork
! queue ! multifilesink location=rec%05d.flac next-file=1 fork. ! queue !
tcpclientsink host=192.168.5.10 port=443
```

Figura 33 ilustrează execuția acestei subrutine, precum și rezultatele acesteia.

```
root@SMU:~# gst-launch -e -v alsasrc ! audio/x-raw-int, endianness="(int)1234", s ^
igned="(boolean)true", rate="(int)16000", channels="(int)4", width="(int)8", dept
h="(int)8" ! queue ! audiorate ! flacenc ! tee name=fork ! queue ! multifilesink
location=rec%05d.flac next-file=1 fork. ! queue ! tcpclientsink host=192.168.3.11
4 port=443

Setting pipeline to PAUSED ...
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0: actual-buffer-time = 191812
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0: actual-latency-time = 21312
/GstPipeline:pipeline0/GstAlsaSrc:alsasrc0.GstPad:src: caps = audio/x-raw-int, en
dianness=(int)1234, signed=(boolean)true, rate=(int)16000, channels=(int)4, chann
el-positions=(GstAudioChannelPosition)< GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_LEFT, GS
T_AUDIO_CHANNEL_POSITION_FRONT_RIGHT, GST_AUDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_LEFT, GST_A
UDIO_CHANNEL_POSITION_REAR_RIGHT >, width=(int)8, depth=(int)8
Pipeline is live and does not need PREROLL ...
Setting pipeline to PLAYING ...
New clock: GstAudioSrcClock
/GstPipeline:pipeline0/GstTCPCClientSink:tcpclientsink0.GstPad:sink: caps = audio/
x-flac, channels=(int)4, rate=(int)16000, streamheader=(buffer)< 7f464c4143010000
02664c61430000002212001200000000000000003e806700000000000000000000000000
00000, 84000028200000007265666572656e6365206c6962464c414320312e322e31203230303730
/GstPipeline:pipeline0/GstMultiFileSink:multifilesink0.GstPad:sink: caps = audio/
x-flac, channels=(int)4, rate=(int)16000, streamheader=(buffer)< 7f464c4143010000
02664c61430000002212001200000000000000003e806700000000000000000000000000
00000, 84000028200000007265666572656e6365206c6962464c414320312e322e31203230303730
Got EOS from element "pipeline0".
EOS received - stopping pipeline...
Execution ended after 20776097730 ns.
```

Figura 33. Rezultatele rutinei de stocare temporară a formelor de undă, împreună cu cea de transmisie (sursa: autorul, utilizând librăriile GStreamer)

Deoarece orice transmisie de date în rețea necesită un client și un server, comanda detaliată anterior necesită o altă comandă echivalentă, rulată în prealabil pe un calculator de teste cu rol de receptor al stream-ului formelor de undă cu scopul de a le consolida împreună cu PDC-ul micro-rețelei WAMPAC.

La finalul testelor se observă faptul că receptorul stream-ului formelor de undă comprimate generează un fișier pe suportul său de memorie, ca urmare a recepției datelor, iar prototipul SMU generează în mod similar un fișier pe suportul său de memorie, simultan cu transmiterea formelor de undă, cu scopul de a putea recupera ulterior forme de undă care, accidental, nu au putut fi transferate (conform cerințelor din secțiunea 2.5.4. a tezei).

Criteriul de integritate al datelor, definit, analizat și prezentat în secțiunea 2.6.1.3., impune ca cele două fișiere (cel generat de prototipul SMU la momentul achiziției și cel generat de receptorul experimental la momentul primirii datelor) să fie identice sau, cu alte cuvinte, să dețină semnături digitale de tip MD5 sau SHA1 identice.

Figura 34 de mai jos arată faptul că în urma testelor de validare, cele două semnături ale fișierelor menționate anterior sunt într-adevăr identice, ceea ce confirmă indubitabil eficiența transmisiei de date inițiate de prototipul SMU dezvoltat de autor.

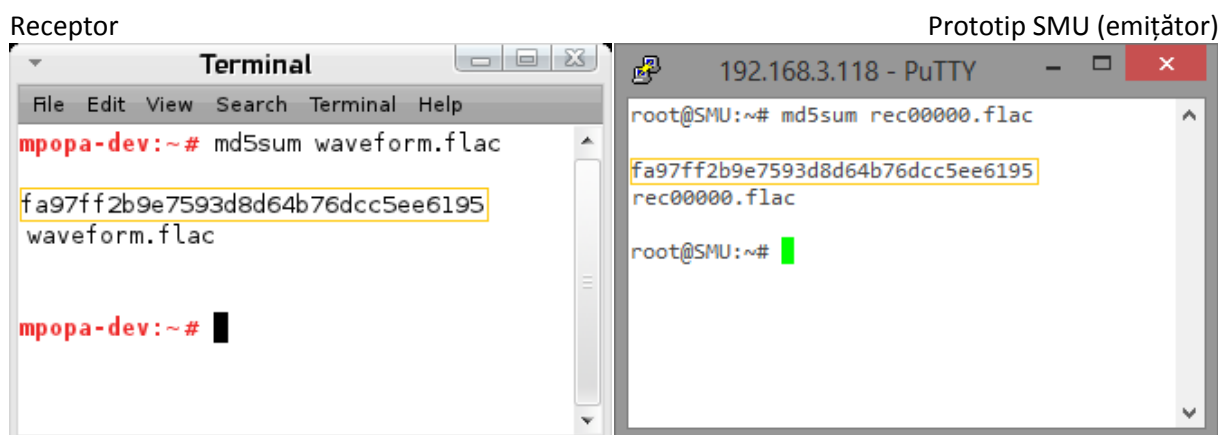


Figura 34. Validarea faptului că formele de undă transmise de prototipul SMU (dreapta) și primite de receptorul experimental (stânga) sunt identice (sursa: autorul)

Rezultatele arată de asemenea că datele transmise de un PMU actual către PDC sunt necriptate și pot fi cu ușurință interceptate și alterate (figura 36), în comparație cu date transmise de prototipul SMU către receptorul experimental, care sunt criptate și, astfel securizate împotriva atacurilor cibernetice (figura 36)

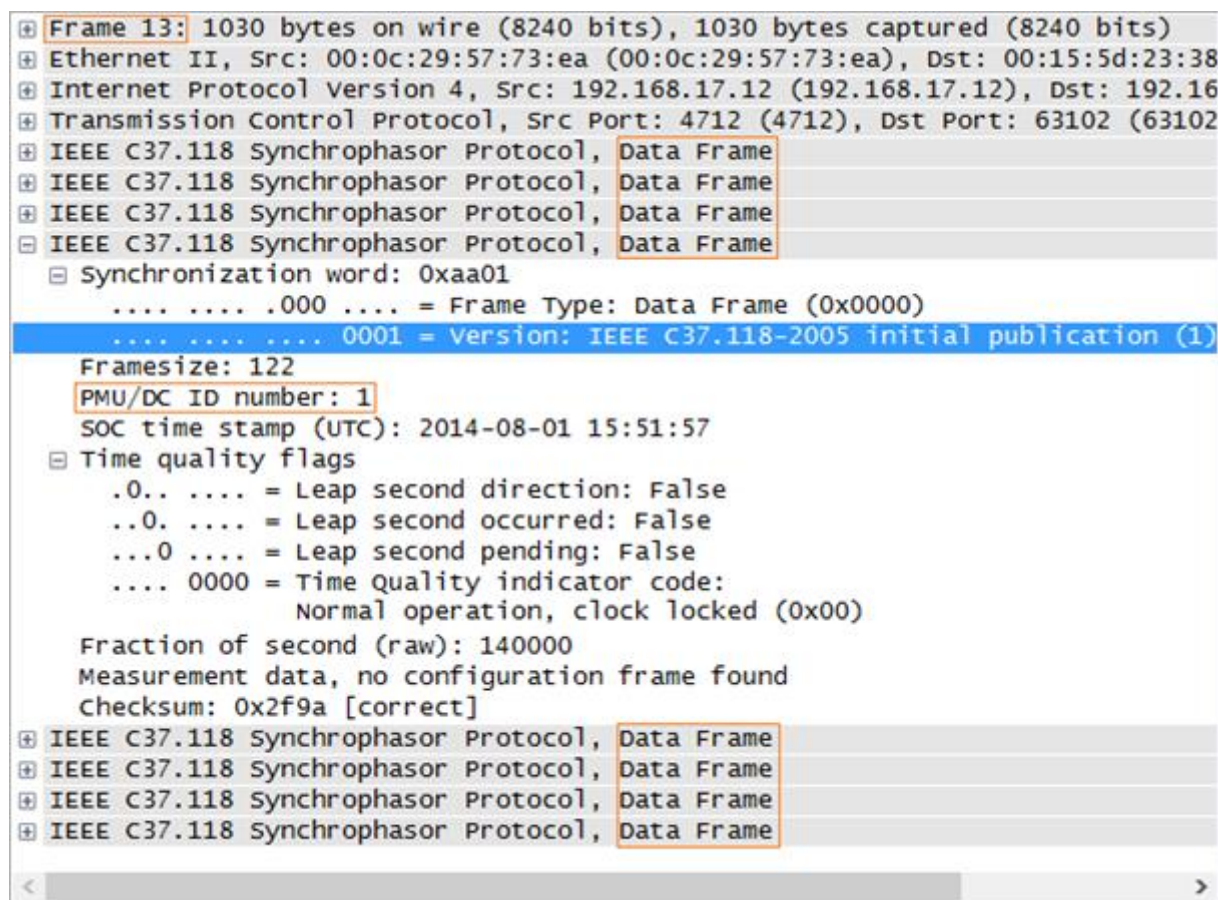


Figura 35. Validarea faptului că echipamentele PMU din cadrul rețelei WAMPAC studiate transmit datele în format necriptat (sursa: autorul, utilizând utilitarul de diagnostic Wireshark)

```

▶ Frame 33: 1514 bytes on wire (12112 bits), 1514 bytes captured (12112 bits)
▶ Ethernet II, Src: 00:1f:1f:7e:3f:ab (00:1f:1f:7e:3f:ab), Dst: 00:24:d7:b9:5
▶ Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.3.118 (192.168.3.118), Dst: 192.1
▶ Transmission Control Protocol, Src Port: 47810 (47810), Dst Port: 443 (443)
▶ Secure Sockets Layer

0000  00 24 d7 b9 58 08 00 1f 1f 7e 3f ab 08 00 45 00  .$.X... .~?...E.
0010  05 dc 74 25 40 00 40 06 38 be c0 a8 03 76 c0 a8  ..t%@.@. 8....v..
0020  03 72 ba c2 01 bb be 09 32 4a 9b 3a 2f 52 80 18  .r..... 2J.:/R..
0030  00 73 90 90 00 00 01 01 08 0a 00 25 58 fb 05 07  .s..... %X...
0040  d6 a3 4f 66 ff f2 cb 97 fe 5f ff f2 e5 94 bf 2e  ..Of.... _.....
0050  6f 96 59 a6 97 34 b9 a6 ff 29 4b 97 e5 ca 6c fe  o.Y..4.. )K...l.
0060  9a 52 ce cb 37 36 6c e9 4a 74 a5 f9 65 34 fd 9f  .R..76l. Jt..e4..
0070  fa 7f d3 ec f7 e5 ca 53 a7 4d 37 97 2f ff 2f 94  ....S .M7././..
0080  b9 66 cd fc df 29 66 e5 e6 97 9b cd 2c bf ff f9  .f...)f. ....,....
0090  7c b2 f2 ff 29 be 59 65 29 79 7e 6c d2 cb 34 d9  |...).Ye )y~l..4.
00a0  65 9a 6f 9a 59 b9 4a 59 fd 34 a6 cb 96 7b 34 ee  e.o.Y.JY .4...{4.
00b0  53 d3 72 e6 cf ec d0 94 bf fc e9 b2 e5 fc bf e5  S.r.....
00c0  cb 97 2f f2 e5 cb 9b ff 36 59 df 2f ff 2f 9e ce  ../..... 6Y././..
00d0  f2 ff cb fc bf 9b f9 79 7c b9 7f 9b f9 67 4b 9b  ....y |....gK.
00e0  f9 b9 66 ff ff ff 2f ff 2c be 52 f2 e5 e5 ff 97  ..f.../. ,.R.....
00f0  f9 72 e5 cd 3a 69 4f df 34 a5 36 53 72 94 d9 79  .r...:i0. 4.6Sr..y
0100  b2 e5 36 6f 37 2f f3 df 9a 59 65 cb e5 f9 65 34  ..6o7/.. .Ye...e4
0110  dc bf 97 fe 5f e5 cb fc bf cb cb 2c f4 bc b3 7e  ...._.... ,....~
0120  5e 5f ff fc 0b ff cb 2e 6f 2c df 34 a7 4b 97 fc  ^_..... o,.4.K..
0130  ef 97 2f f9 66 9d f9 72 ff e5 ff cb cb ff ff 9b  ../.f..r .....
0140  2f ff ff fe 5f 97 ff 2f ff e5 f9 4b ff ff 97 97  /... .. / ...K....

```

Figura 36. Conținutul detaliat al unui pachet criptat transferat de la SMU la receptorul formelor de undă
(sursa: autorul, utilizând utilitarul de diagnoză Wireshark)

În urma evaluării economice realizate de către autor în secțiunea 3.3. a tezei de doctorat, reiese o perioadă de amortizare a investiției inițiale în prototipul SMU de $n=2$ ani, ceea ce reprezintă un avantaj major din punct de vedere economic al posibilității de integrare a prototipului SMU în sistemele WAMPAC atașate rețelelor electroenergetice.

Pe de altă parte, rata internă de rentabilitate indică pragul superior până la care rata dobânzii poate crește, astfel încât proiectul de dezvoltare al prototipului SMU este încă rentabil, rezultă în urma calculațiilor realizate de către autor la 18% pe an (figura 37).

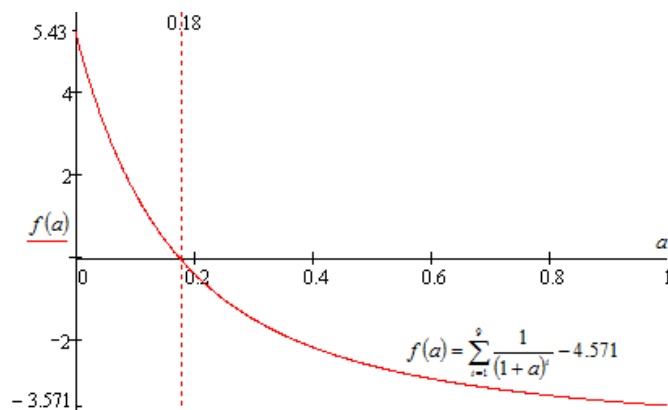


Figura 37. Rata maximă a dobânzii pentru care proiectul prototipului SMU este rentabil
(sursa: autorul)

Capitolul 4

**Concluzii, Contribuții personale,
Direcții noi de cercetare**

Rețelele WAMPAC și WAMS au cunoscut recent o dezvoltare accelerată datorită progresului tehnic din toate celelalte domenii conexe (precum: tehnica de calcul, tehnologiile și capacitățile de stocare, precum și costurile ca urmare a eficientizării liniilor de producție), ceea ce a condus la instalarea unui număr tot mai mare de echipamente PMU pe barele rețelelor electroenergetice, cu scopul final de a crește observabilitatea fenomenelor macro-energetice ce se manifestă simultan pe întregul teritoriu geografic al unei rețele de distribuție electrică.

Se pune însă tot mai frecvent întrebarea dacă doar mărirea numărului de echipamente PMU amplasate strategic în punctele cheie ale rețelei electroenergetice este singura soluție pentru maximizarea observabilității, în special în noile condiții în care acest număr ridicat al nodurilor de comunicații (reprezentate de PMU-uri și PDC-uri) de date atrage după sine o complexitate mult mai mare a infrastructurii, a gestiunii, precum și a riscurilor de atac cibernetic asupra stabilității rețelei electroenergetice.

4.1. Concluzii finale

În cadrul prezentei teze, autorul a studiat și analizat deficiențele modelului actual de achiziție a datelor (a parametrilor electrici de calitate a energiei) de pe barele rețelei electroenergetice (secțiunile 2.2 și 2.3), ale modelului actual de stocare a acestora în cadrul echipamentului responsabil cu obținerea datelor (secțiunea 2.5.1), precum și ale modelului actual de transmisie în timp real a datelor obținute de către echipament (2.6.2), prin teste și simulări amănunțite asupra unei micro-rețele WAMS de acest gen (secțiunea 3.1.).

În urma acestor studii detaliate, autorul a concentrat un nucleu al cerințelor absolut necesare pe care echipamente PMU utilizate în prezent ar trebuie să le îndeplinească (secțiunea 2.6.1), pornind de la noțiuni perfecționate în timp, experiențe acumulate și inovații deja accesibile în alte domenii, precum telecomunicațiile, criptografia/securitatea și ingineria calculatoarelor (secțiunea 1.2).

În teză am proiectat și realizat un prototip al echipamentului SMU, a cărui denumire (*Synchronized Measurement Unit*) dorește să inducă o similitudine cu numele PMU (*Phasor Measurement Unit*) folosit în prezent, însă totodată dorește să scoată în evidență faptul că scopul unui astfel de echipament SMU nu este acela de a capta și de a transmite în timp real și într-o manieră sincronă (folosind referințe de timp ultra-exacte prin tehnologia GPS)

întreaga formă de undă la înaltă rezoluție a curentului și tensiunii electrice de pe toate cele trei faze din segmentul de rețea electroenergetică unde acesta este amplasat, spre deosebire de echipamentele actuale PMU care doar realizează calculația/estimarea parametrilor electrici ai rețelei electroenergetice din nodul considerat (precum fazorii, frecvența instantanee și rata de variație a frecvenței oferite de PMU-uri). Proiectarea și dezvoltarea acestui prototip au impus soluționarea unor provocări tehnice importante, precum:

- a. necesitatea integrării unui algoritm de compresie/decompresie, deoarece volumul ridicat de date obținute ca urmare a înaltei rezoluții propuse drept scop central făcea imposibilă transmisia datelor în timp real și
- b. necesitatea interconectării unui componente hardware de tip micro-UPS care să confere autonomie prototipului SMU (similar unui laptop cu baterie proprie), cu scopul de a putea asigura captarea formelor de undă, chiar și în momentele când tensiunea electrică trece prin etape tranzitorii pre- sau post-perturbație.

Motivul acestei soluții îl reprezintă faptul că echipamentul SMU nu mai poate garanta înregistrarea la înaltă rezoluție a formelor de undă din timpul unei perturbații, dacă însuși echipamentul este afectat de acea perturbație.

Prototipul SMU dezvoltat de către autor se deosebește însă de un echipament clasic de tip data-logger prin faptul că formele de undă captate de SMU sunt de pe toate cele trei faze A, B și C ale barei și prin faptul că axa timpului din cadrul formelor de undă achiziționate de SMU este sincronizată cu o referință de timp ultra-exactă obținută prin tehnologia GPS.

Utilitatea prototipului SMU este aceea că sistemul WAMAP poate lua măsuri mult mai precise de protecție sau corecție a unor perturbații, cunoscând nu doar parametrii de calitate ai energiei de pe tronsonul de rețea electroenergetică monitorizat, prin intermediul fazorilor, frecvenței instantanee și RoCoF-ului oferite de PMU-uri, ci și prin forma de undă detaliată obținută de SMU la înaltă rezoluție chiar din momentul și din perioadele antemergătoare producerii perturbației, măbind în acest fel observabilitatea rețelei electroenergetice în mod considerabil.

4.2. Contribuții personale originale

În ansamblul său, lucrarea constă într-o integrare atât a elementelor de studiu asupra soluțiilor și implementărilor de ultimă generație în domeniul echipamentelor PMU și rețelelor WAMS și WAMPAC, realizată de către autor prin cercetări intensive și teste amănunțite, cât și a elementelor de proiectare, prototipare, dezvoltare hardware și software realizare în întregime de către autor și descrise în amănunt în cuprinsul acestei teze.

Primele secțiuni ale tezei sintetizează noțiuni și tehnologii relevante din alte domenii conexe, datorită necesității integrării acestora în funcționarea prototipului SMU. Aici autorul a selectat aspectele esențiale pentru soluția propusă în teză, mai ales din domeniul ingineriei electrice, al telecomunicațiilor și securității datelor. Sub acest aspect, teza de doctorat reprezintă o lucrare interdisciplinară din domeniul ingineriei electrice, eliminând detalii irelevante pentru scopul lucrării.

În următoarele secțiuni ale capitolului 2 am prezentat stadiul soluțiilor actuale, metodele și modelele moderne de implementare a acestora în domeniul monitorizării sincronizate a rețelelor electroenergetice inteligente pentru evidențierea deficiențelor și limitărilor acestora care au stat la baza constituirii obiectivului cercetării tezei.

Am realizat integral o soluție conceptuală și tehnologică și am dezvoltat un prototip SMU pentru implementarea, testarea și validarea acesteia. Acest prototip vine în completarea setului de date oferite de echipamentele clasice PMU, prin obținerea exactă a formelor de undă a tensiunilor și curenților la înaltă rezoluție și transmisia integrală a acestora prin procedee consacrate de compresie fără pierderi.

În final, am proiectat și realizat ample teste de validare și monitorizare a comportamentului prototipului SMU, în cadrul unui pilot original, structurat pe două planuri: unul de referință (în care a fost tratat comportamentul elementelor PMU și PDC din cadrul unei micro-rețele WAMS de test) și cel de-al doilea, de testare propriu-zisă a achiziției, stocării și transmisiei datelor de la prototipul SMU proiectat și realizat, către un receptor experimental de date (reprezentat de un calculator personal pe suportul căruia am proiectat un software experimental de stocare și comparație a datelor primite).

Stadiul actual al prototipului SMU proiectat și dezvoltat în cadrul tezei, poate fi descris prin următoarele elemente:

- a. Datele temporare sunt stocate pe suportul de memorie nevolatil într-un singur fișier, în condițiile în care modelul logic al prototipului SMU prevede stocarea datelor într-o secvență de fișiere cu mărime fixă (cu scopul de a gestiona mai bine integritatea acestora în cazul unei defectări a suportului de memorie);
- b. Compresia este realizată cu succes de către componenta FLAC, iar forma de undă nu suferă pierderi în urma ciclului de compresie/decompresie; de asemenea datele sunt transmise în timp real datorită mărimii reduse a formelor de undă, în urma compresiei;
- c. Formele de undă transmise de SMU pot fi vizualizate doar prin intermediul analizei traficului de date, receptorul experimental neavând încă o interfață grafică pentru a afișa în timp real formele de undă recepționate; confirmarea faptului că acestea sunt transferate cu succes reiese din verificarea semnăturii digitale a pachetelor de date și din comparația datelor salvate în memoriile nevolatile ale SMU-ului și receptorului.

- d. Securitatea datelor transmise este realizată, conform prevederilor modelului logic, folosind metoda unor chei asimetrice, însă de complexitate încă redusă;
- e. Datorită modelului actual de stocare a datelor PMU în cadrul PDC-urilor, formele de undă transferate de către prototipul SMU și recepționate de software-ul experimental sunt înmagazinate separat față de baza de date a echipamentului PDC actual, deoarece standardul actual C37.118, conform căruia schema bazei de date a fost organizată, nu prevede câmpuri speciale pentru stocarea unor date în formă binară, precum cea a segmentelor de formă de undă obținute de la SMU.
- f. În forma sa actuală, prototipul SMU achiziționează formele de undă introduse la bornele de intrare ale convertorului A/D de către un generator aleatoriu de semnal (care, în urma studiilor realizate de către autor, reușește să simuleze suficient de realist formele de undă dintr-un segment de rețea electroenergetică); acesta nu deține încă elementele hardware necesare pentru conectarea bornelor de intrare ale convertorului A/D direct pe barele rețelei.

Prin proiectarea, dezvoltarea și realizarea prototipului SMU din cadrul tezei, am demonstrat faptul că un volum semnificativ de mare de date de natură electroenergetică obținute în timp real poate fi transportat la fel de repede la distanțe mari pentru a fi corelate pe baza referințelor sincronizate de timp, ca și un set de date clasice obținute de echipamentele actuale PMU.

În acest fel am propus un nou concept de măsurare sincronizată prin care se realizează o centralizare a elementului de procesare și decizie, lăsând doar elementul „senzorial” (reprezentat de echipamentele SMU), în formă distribuită geografic, amplasat la nivelul fiecărui nod relevant al rețelei de distribuție a energiei electrice.

4.3. Direcții noi de cercetare

Direcțiile noi de cercetare deschise de această teză au ca punct comun de plecare stadiul actual al implementării prototipului SMU, detaliat în secțiunea anterioară.

Așadar, pentru fiecare dintre punctele enumerate mai sus, autorul propune următoarele direcții de dezvoltare ulterioară a prototipului și, în general, al conceptului de măsurare distribuită:

- a. Pentru stocarea datelor într-o secvență de fișiere cu mărime fixă (cu scopul de a gestiona mai bine integritatea acestora în cazul unei defectări a suportului de memorie), precum este descris la punctul a de la pagina 44, autorul propune continuarea cercetării în direcția dezvoltării unui modul de interfațare a componentei software din cadrul prototipului cu sistemul de fișiere ext4 folosit de sistemul Linux Embedded;

- b. Pentru continuarea cercetării pornind de la punctul b de la pagina 44, autorul propune cercetări în direcția optimizării modului de compresie/decompresie FLAC prin parametrii specifici pentru natura semnalelor de pe barele rețelei electroenergetice;
- c. Pentru vizualizarea în timp real la nivelul receptorului experimental a formelor de undă transmise de prototipul SMU (conform celor prezentate la punctul c de la pagina 44), este necesară dezvoltarea în continuare a unei interfețe grafice care să poată ilustra în timp real aceste forme de undă; Această direcție nouă de cercetare este complexă, deoarece presupune nu doar realizarea interfeței grafice, ci și a întregului mecanism de decompresie și căutare a secvențelor formei de undă în funcție de referința de timp introdusă de utilizator;
- d. În strânsă legătură cu punctul anterior, dar și cu litera e de la pagina 45, se află propunerea autorului referitoare la noile direcții de cercetare, de a dezvolta un algoritm de integrare a măsurătorilor deja furnizate de PMU-uri și stocate în bazele de date ale PDC-urilor, cu secvențe de forme de undă obținute în timp real de la prototipul SMU. Acest algoritm ar necesita prelucrarea stream-ului oferit de SMU, separarea secvențelor de forme de undă conform intervalelor măsurate de PMU și stocarea lor într-o bază de date separată cu referințe către baza de date PDC.
- e. Pentru îmbunătățirea criptării formelor de undă transmise de SMU (conform celor prezentate la punctul d de la pagina 45), autorul propune o nouă direcție de cercetare în scopul integrării unor algoritmi mai complecși, folosind chei criptare pe 2048 sau 4096 de biți și generatoare de numere aleatorii mai puțin predictibile, eventual integrate cu generatoare hardware de zgomot aleatoriu.
- f. În strânsă legătură cu punctul f de la pagina 45, se află una dintre cele mai importante direcții noi de cercetare. Aceasta se referă la faptul că bornele de intrare ale convertorului A/D integrat în prototipul SMU, trebuie conectate la barele rețelei electroenergetice, fie pe segmente de mică tensiune, fie pe cele de medie sau înaltă tensiune. Pentru acest lucru este necesară integrarea unor transformatoare de măsură sau a unor amplificatoare de măsură cu separație, pentru a proteja intrările convertorului A/D și, de asemenea, implementarea unui algoritm de corecție software a întârzierilor sau deformărilor formelor de undă pe care aceste elemente electronice le pot introduce.

Capitolul 5

Bibliografie selectivă

Lucrări publicate

- [1] Albu, M., Kyriakides, E., Chicco, G., Popa, M., Nechifor, A., "Online Monitoring of the Power Transfer in a DC Test Grid" in *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement* vol. 59, 2010, pp. 1104-1118, **Indexată IEEE Xplore și ISI Web of Knowledge**
- [2] Albu, M., Diaz, J., Thong, V., Neurohr, R., Federenciuc, D., Popa, M., *et al.*, "Measurement and remote monitoring for virtual synchronous generator design" in *Applied Measurements For Power Systems (AMPS), 2010 IEEE International Workshop on*, 2010, pp. 7-11, **Indexată IEEE Xplore**
- [3] Albu, M., Boicea, A. V., Calin, M., Popa, M., "Emerging smart grid topics in electrical engineering education" in *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, 2011, pp. 1-6, **Indexată IEEE Xplore**
- [4] Nechifor, A., Marin, M., Nicolaou, G., Popa, M., "Online measurements and control of a laboratory scale DC grid" in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC '09. IEEE*, 2009, pp. 1701-1706, **Indexată IEEE Xplore și ISI Web of Knowledge**
- [5] Popa, M., Albu, M., "Implementation overview of PMU functionalities on a regular computer" in *Smart Measurements for Future Grids (SMFG), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 40-44, **Indexată IEEE Xplore**
- [6] Popa, M., Calin, M., Ciornei, S., Dumitrescu, A. M., "Flexible and Mobile Deployment of Synchronized Measurement Systems for Active Distribution Grids" in *Applied Measurements for Power Systems, 2014 IEEE International Workshop on*, 2014, **Nepublicată, confirmată spre indexare IEEE Xplore și ISI Web of Knowledge**

Surse citate

- [7] Almas, M. S., Vanfretti, L., "Real-Time Hardware-in-the-Loop Validation for WAMPAC: Power System Protection and Communication" in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Panel Session*, 2012.
- [8] Bank, J., Kroposki, B., "Development of a real-time, high-speed distribution level data acquisition system" in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*, 2012, pp. 1-6.
- [9] Benjin, W., Lei, M., Huiying, D., Jiangtao, L., Zeguang, Z., Hongyi, L., "Design of dynamic synchronous multi-channel data acquisition system for lung sound based on FPGA" in *Information and Automation (ICIA), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 768-771.
- [10] Chakrabarti, S., Eliades, D., Kyriakides, E., Albu, M., "Measurement Uncertainty Considerations in Optimal Sensor Deployment for State Estimation" in *Intelligent Signal Processing, 2007. WISP 2007. IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 1-6.

- [11] Chakrabarti, S., Kyriakides, E., Eliades, D. G., "Placement of Synchronized Measurements for Power System Observability" in *IEEE Transactions on Power Delivery* vol. 24, 2009, pp. 12-19.
- [12] Daming, L., Yong, W., XiuXia, T., Jun, Y., "Research of High-speed Data Acquisition Card Driver Based on Embedded System for ICRH System on EAST" in *Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI), 2010 International Conference on* vol. 3, 2010, pp. 409-413.
- [13] Electric Power Research Institute (EPRI), Kezunovic, M., Popovic, T., "Wide Area Monitoring, Protection, and Control Systems (WAMPAC) - Standards for Cyber Security Requirements", National Electric Sector Cybersecurity Organization Resource (NESCOR), Ed., 2012.
- [14] Fan, Dawei, "Synchronized Measurements And Applications During Power System Dynamics - PhD Thesis", V. Centeno, Ed. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute - State University, 2008.
- [15] IEEE, "Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems" in *Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, 2011, pp. 1-53.
- [16] Kawano, F., Beaumont, P., Ishibashi, A., Hamamatsu, K., Tada, Y., Serizawa, Y., "Development of prototype wide-area monitoring, protection and control (WAMPAC) systems based upon international standards" in *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*, 2013, pp. 1-6.
- [17] Martinez, C., Eto, J., Dyer, J., "Real Time Performance Management Tools for Wide Area Operations in Competitive Markets" in *Control Center Issues session, IEEE General Meeting* vol. 2, 2003, pp. 1042-1044.
- [18] Morris, T. H., Shengyi, Pan, Adhikari, U., "Cyber security recommendations for wide area monitoring, protection, and control systems" in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-6.
- [19] Novosel, D., Vu, K., Centeno, V., Skok, S., Begovic, M., "Benefits of Synchronized-Measurement Technology for Power-Grid Applications" in *System Sciences, 2007. HICSS 2007. 40th Annual Hawaii International Conference on*, 2007, pp. 118-118.
- [20] Ogiboski, L., Bravo Pariente, C. A., Magrini, L. C., Jardini, J. A., "Real-Time System for Remote Data Acquisition in Power Station Equipments" in *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* vol. 11, 2013, pp. 865-869.
- [21] Thomas, J., Rajasekaran, C., "Real time data acquisition system with self adaptive sampling rate using GPU" in *Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering (PRIME), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 131-135.
- [22] Vanfretti, L., Chenine, M., Almas, M. S., Leelaruji, R., Angquist, L., Nordstrom, L., "SmarTS Lab - A laboratory for developing applications for WAMPAC Systems" in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-8.
- [23] Wang, L., Chen, C., Ma, L., Shen, J., "Development of Multi-functional Virtual Oscilloscope Based on Soundcard" in *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on* vol. 1, 2011, pp. 1056-1059.
- [24] Wen, L.-J., "The analysis of uncertainty of frequency measurement result of Quartz Crystal Oscillator" in *Gansu Science and Technology* vol. 22, 2006, pp. 1-2.

- [25] Xu, X. S., Wang, G. Q., Wang, Y. I., Zhang, H. J., Li, X. H., "Study on precise frequency measurement based on sound card" in *Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on*, 2009, pp. 2-455-2-458.
- [26] Ye, Fan, "FPGA-based data acquisition system" in *Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 1-3.
- [27] Ye, Z., Zhi-Zhong, X., "Error test and analysis of sound card sampling rate" in *Metallurgical Industry Automation Supplement*, 2007, pp. 1-3.

Web

- [28] Boulton, R. J., Walthinsen, E., Baker, S., Johnson, L., Bultje, R. S., Kost, S., *et al.* (2013, mar.2014). *GStreamer Plugin Writer's Guide*. URL: <http://gstreamer.freedesktop.org/data/doc/gstreamer/head/pwg/pwg.pdf>
- [29] Cai, J. Y., Zhenyu, Huang, Hauer, J., Martin, K. (2005). *Current Status and Experience of WAMS Implementation in North America*.
- [30] Etek Navigation Inc. (2006, iun.2014). *MTK NMEA checksum calculator*. URL: <http://www.hhhh.org/wiml/proj/nmeaxor.html>
- [31] Falk, H. (2012, ian.2014). *IEC 61850-90-5 - an Overview*. URL: http://www.pacw.org/issue/december_2012_issue/iec_61850905_an_overview/iec_61850905_an_overview/complete_article/1.html
- [32] National Instruments. (2014, ian.2014). *CompactRIO Adviros - Build your own cRIO system*. URL: <http://ohm.ni.com/advisors/crio/pages/common/intro.xhtml>
- [33] OpenWrt. (2014, mar.2014). *OpenWrt 12.09 Image Builder*. URL: http://downloads.openwrt.org/12.09/x86/generic/OpenWrt-ImageBuilder-x86_generic-for-linux-ix86.tar.bz2
- [34] Parashar, M., Dyer, J., Bilke, T. (2005, dec.2013). *EIPP Real-Time Dynamics Monitoring System*. URL: http://www.phasor-rtdms.com/downloads/research/EIPPRTDMS_HICSS-Paper010506%20.pdf
- [35] Quectel Wireless Solutions Co Ltd. (2012, feb.2014). *L10 GPS Module Specifications*. URL: http://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel_L10_GPS_Specification_V1.0.pdf
- [36] UfE - Umweltfreundliche Energieanlagen GmbH. (2009, dec.2013). *Grid recorder system description*. URL: http://www.ufegmbh.de/pool/download/datenblaetter/UFE/GS/UfEGS_description_of_the_system.pdf