

**METHODS FOR ENHANCING POWER LINE COMMUNICATION OVER LOW
VOLTAGE NETWORKS (ORIGINAL TITLE)**

**TEHNICI DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A PERFORMANTELOR COMUNICAȚIEI PRIN
LINIILE DE ALIMENTARE CU ENERGIE ELECTRICĂ DE JOASĂ TENSIUNE
(Traducere)**

Teză de doctorat – Rezumat în limba engleză

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

autor ing. Sebastian Avram

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Radu VasIU

luna septembrie anul 2023

1 Introducere

Principalele direcții de cercetare abordate în această teză de doctorat sunt evitarea și filtrarea emisiilor conduse (CE) prezente în rețeaua electrică. Ambele tehnici au scopul de a crește performanța, eficiența și eficacitatea comunicațiilor pe liniile rețelei electrice (PLC) de joasă tensiune.

Tehnicile de evitare a zgomotului și de filtrare cercetate au scopul de a crește fiabilitatea și viteza de comunicație, precum și scăderea ratei de eroare și a latenței.

1.1 Structura tezei

Teza este structurată în felul următor:

Capitolul 1 prezintă motivația pentru care s-a ales ca și subiect al tezei metode de îmbunătățire a comunicațiilor de bandă îngustă pe liniile electrice de joasă tensiune (NB-PLC).

Scopul și obiectivele împreună cu ipotezele și limitările tezei sunt de asemenea prezentate în acest capitol. Lista de articole de cercetare științifică publicate pe parcursul studiilor, ca autor principal, ce dezvoltă aceeași temă de cercetare științifică este inclusă în primul capitol.

Capitolul 2 oferă o introducere în PLC acoperind următoarele aspecte: principiul de funcționare al PLC, caracteristicile canalului de comunicație, aplicații PLC în rețeaua de distribuție a energiei electrice, standardizarea împreună cu lacunele de standardizare, protocoale PLC și alocarea spectrului de frecvență, precum și tehnici de cuplare ale semnalului PLC.

Capitolul 3 prezintă o metodă inovatoare de detectare a dispozitivelor conectate la linia de alimentare, care generează CE în banda de frecvență a PLC. Abordarea implică utilizarea contoarelor inteligente (SM) pentru a stabili o legătură între măsurătorile de energie ale sarcinii și rapoartele de calitate ale comunicației obținute de la modemul PLC-G3. Prin observarea rezultatelor practice, devine evidentă relația între măsurătorile de energie și zgomotul generat de sarcini, permițând astfel crearea unui program de transmisie pentru PLC.

Capitolul 4 discută o abordare nouă, introdusă pentru proiectarea și simularea filtrelor de linie de alimentare (PLF) folosind parametrii S. Deși parametrii S au fost aplicați în alte cercetări în domeniul tehnicilor frecvențelor înalte, această lucrare este prima care utilizează această strategie specială pentru proiectarea PLF-urilor pentru aplicații de filtrare în banda de

frecvență NB-PLC. Un PLF pasiv de ordinul 13 a fost creat pentru a ilustra viabilitatea tehnicilor de proiectare propuse. Pe baza acestor rezultate, este posibilă dezvoltarea PLF-uri cu performanțe superioare celor disponibile pe piață, în ceea ce privește atenuare în banda de frecvență NB-PLC, consumul de putere și impedanța de intrare/ieșire.

Capitolul 5 este partea finală a tezei de doctorat, unde sunt sintetizate concluziile generale extrase din cercetările efectuate pe parcursul studiilor. Sunt prezentate apoi contribuțiile teoretice pe care aduse în domeniul cercetării PLC, împreună cu contribuțiile practice nou dezvoltate. Încheierea lansează noi direcții de cercetare în acest domeniu particular de studiu care ar fi interesant de explorat pe viitor.

1.2 Obiective inițiale

Pentru a stabili claritatea, această secțiune va sublinia sfera și obiectivele tezei. Acesta va defini aspectele specifice ale PLC, care vor fi abordate. În plus, vor fi precizate rezultatele și obiectivele urmărite.

Această teză oferă răspunsuri ample la aceste întrebări:

1. Cum și de ce este PLC integrat în rețeaua electrică?
2. Care sunt problemele cu care se confruntă PLC în rețeaua de distribuție a energiei electrice?
3. Există vreo modalitate de a rezolva aceste probleme fără nicio modificare a rețelei electrice? Cum se implementează această tehnică de îmbunătățire neinvazivă?
4. Ce modificări ar putea fi necesare în rețeaua electrică? Cum se implementează aceste modificări?

1.3 Ipotezele și limitările acestei cercetări

Prezentarea ipotezelor făcute în cadrul cercetării este esențială pentru a menține transparența și a-i stabili limitările. Această secțiune va discuta limitările cercetării, cum ar fi condiții specifice sau scenariile care nu sunt luate în considerare.

Conceptele cercetate și prezentate în această teză au fost dezvoltate pentru benzile de frecvență CENELEC A, B, C și D și validate în mediu de laborator utilizând configurații de măsură derivate sau identice cu cele din standarde internaționale, care sunt potrivite pentru rețeaua electrică europeană. Extinderea utilizării la benzile FCC (9-490kHz) [1] și ARIB (10-450kHz) [2], precum și la diferite standarde de rețea electrică (de exemplu rețeaua electrică nord-americană), este posibilă, dar necesita reproiectare din cauza topologiei diferite de rețea electrică, benzi de frecvență diferite și standarde specifice.

1.4 Introducere

În introducere sunt abordate următoarele subiecte: principiul de funcționare al PLC, proprietățile canalelor de comunicație utilizate de PLC, aplicațiile PLC în rețeaua de distribuție a energiei electrice, standardizarea împreună cu lacunele existente, protocoalele PLC și alocarea spectrului de frecvență, precum tehnici de cuplare a semnalului PLC.

PLC folosește liniile electrice existente ca mediu de transmisie, pe care un semnal de frecvență relativ înaltă de amplitudine mică este suprapus peste forma de undă a rețelei de joasă frecvență și amplitudine mare [3]. Figura 1.1 prezintă principiul de bază al PLC, în timp ce Figura 1.2 prezintă două dispozitive PLC care comunică între ele.

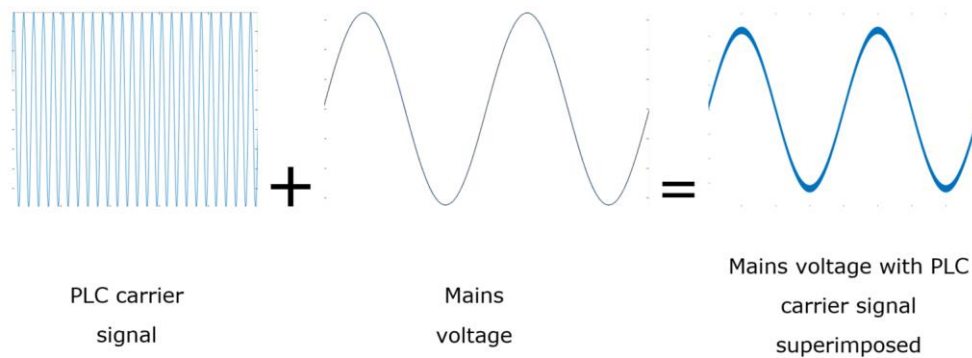


Figura 1.1 Principiul de funcționare al PLC

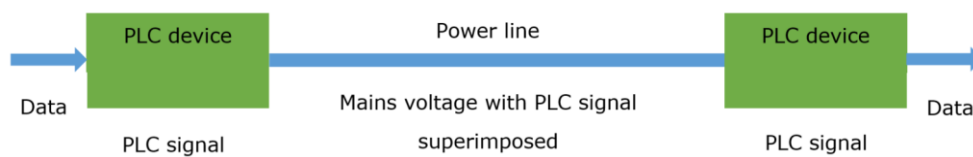


Figura 1.2 Două modemeuri PLC care comunică

PLC utilizează liniile electrice existente, ceea ce ridică numeroase provocări, precum topologia variată a rețelei, emisiile conduse, atenuare și impedanțe scăzută. Figura 1.3 prezintă modelul simplificat al canalului PLC.

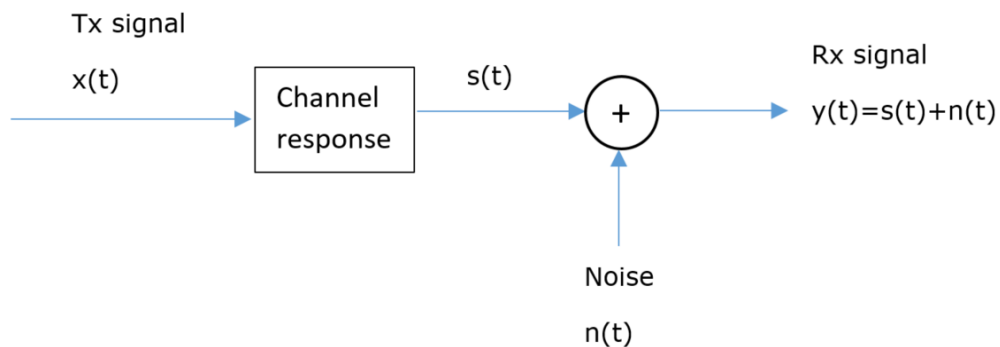


Figura 1.3 Modelul simplificat al PLC

2 Tehnici de detectare a sursei perturbațiilor conduse și evitarea lor

În acest capitol, este propusă o nouă abordare pentru a identifica sarcinile care generează zgomot în banda de frecvență a PLC. Metoda implică utilizarea SM pentru a stabili o corelație între măsurătorile de putere ale sarcinii și rapoartele de calitate obținute de la canalul modemului PLC-G3.

Prin examinarea rezultatelor practice, se poate observa o legătură clară între măsurătorile de putere și perturbațiile provenite de la sarcini specifice. Pentru a valida în continuare constatările, au fost efectuate măsurători ale spectrului folosind PLC-G3 pe liniile electrice atât cu impedanță scăzută, cât și cu impedanță ridicată, permițând o comparație cuprinzătoare cu spectrul de zgomot. Această corelație permite crearea unui program de transmisie în funcție de momentul în care sunt operate sarcinile generatoare de zgomot.

O metodă eficientă de reducere a zgomotului este utilizarea unui PLF poziționat între contorul de energie electrică și consumator. Acest filtru are scopul de a elimina zgomotul din banda PLC, dar are un cost și introduce pierderi la frecvența rețelei. Această opțiune de îmbunătățire a PLC este prezentată în capitolul 4 al tezei.

Pentru a evita perturbațiile conduse, se poate opta pentru benzile de frecvență PLC care operează peste 150 kHz și care sunt acoperite de reglementările standardizate privind emisiile.

Benzile de frecvență disponibile pentru NB-PLC includ FCC și ARIB, deși în Europa, doar banda CENELEC-A este alocată special pentru comunicarea PLC.

2.1 Conceptul de detectare a sursei perturbațiilor conduse și evitarea lor

Sarcinile conectate pe partea clientului, care introduc CE în banda de frecvență PLC, pot fi identificate eficient prin folosirea SM-urilor. Acest lucru se realizează prin utilizarea rapoartelor de calitate ale canalului, obținute de la modemul PLC și a măsurătorilor de energie achiziționate de la ADC de metrologie. Figura 2.1 este schema bloc a unui SM cu PLC [4]–[9] care este capabil să creeze o corelație între consumul de putere al sarcinii și zgomotul generat de sarcină.

Dincolo de conceptul SM discutat din Figura 2.1, s-a proiectat un sistem de contorizare care utilizează aceleași modemi PLC-G3 de la Texas Instruments™. Cu toate acestea, sistemul încorporează un AFE de metrologie de ultimă oră de la Analog Devices™, capabil de autocalibrare împreună cu automonitorizarea metrologică a senzorului și care are un concept de alimentare ce cuprinde un convertor flyback neizolat urmat de un convertor buck.

Motivația principală din spatele dezvoltării noului concept SM a fost investigarea potențialei interferențe între tehnologia mSure™ utilizată în AFE de măsurare și PLC. Acest lucru se datorează faptului că mSure™ suprapune un semnal CA proprietar pe forma de undă CA de rețea, care trece prin șuntul metrologic în scopul autocalibrării și supravegherii senzorului. Conectivitatea Wi-Fi a fost introdusă pentru a oferi o opțiune de rezervă pentru conectivitate în situațiile în care comunicarea PLC ar putea fi nesigură și o conexiune Wi-Fi fiabilă este disponibilă.

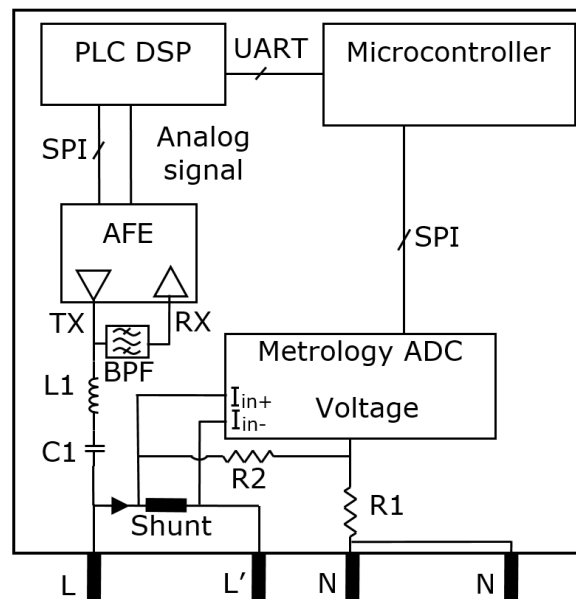


Figura 2.1 Arhitectura unui SM monofazat cu PLC

Măsurătorile de SNR, RSSI, BER și puterea au fost efectuate utilizând bancul de măsură și metodele din Figura 2.2.

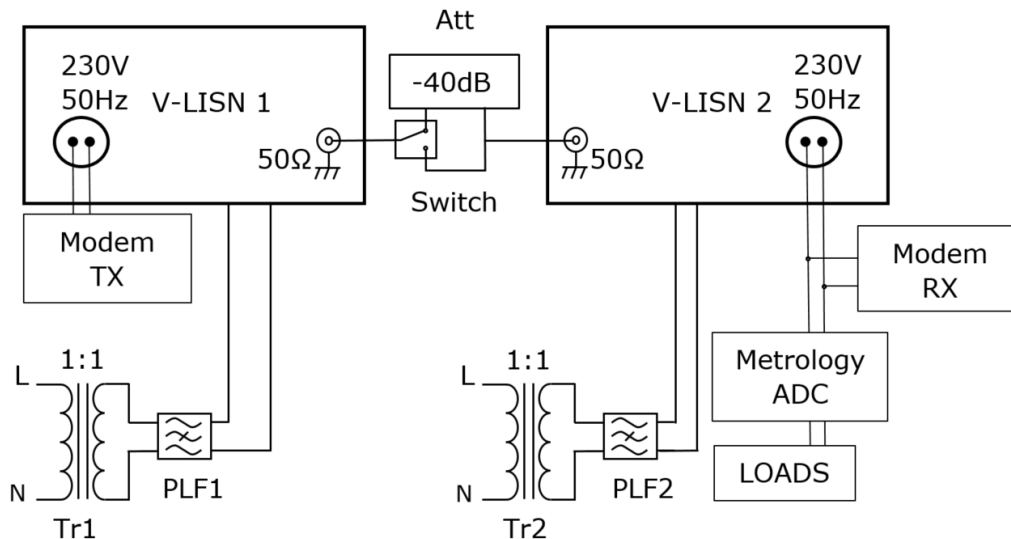


Figura 2.2 Banc de încercări pentru măsurarea SNR și RSSI PLC

Figura 2.3 împreună cu Figura 2.4 prezintă rezultatele măsurătorilor calității canalului PLC-G3; un modem este în modul TX și celălalt în modul RX. S-au măsurat SNR și RSSI sub influența a șase sarcini uzuale. Aceste măsurători au fost efectuate atât cu, cât și fără atenuarea de -40dB introdusă între cele două modemuri. Atenuarea are scopul de a emula caracteristicile unui segment din rețeaua de electricitate, permițând simularea în condiții de testare mai apropiate de cele întâlnite în realitate.

SNR and RSSI measurement without attenuation

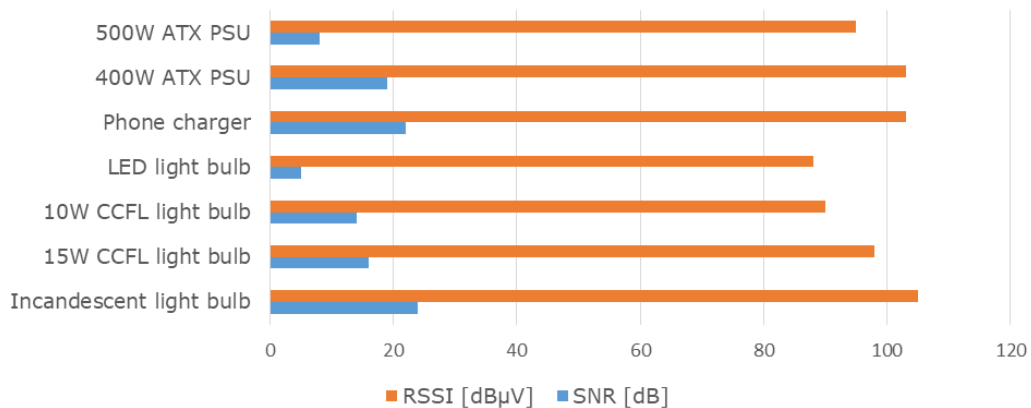


Figura 2.3 Valorile SNR și RSSI fără atenuare

SNR and RSSI measurement with -40dB attenuation

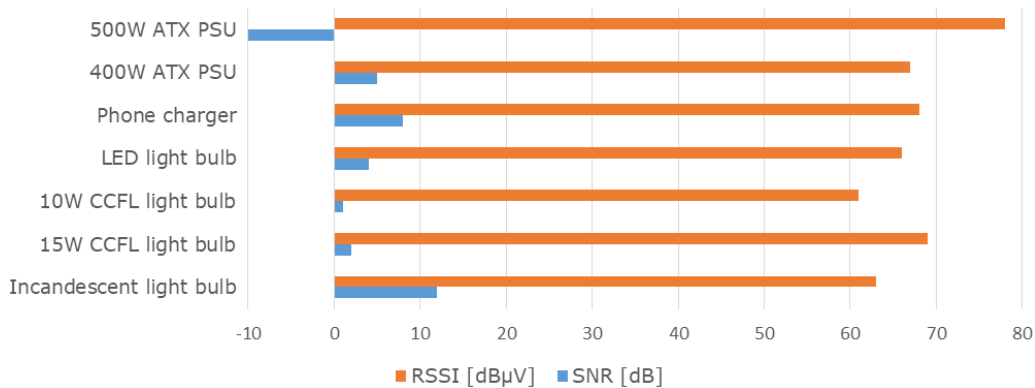


Figura 2.4 Valorile SNR și RSSI cu atenuare de -40dB

Figura 2.5 prezintă măsurătorile de putere ale sarcinilor pentru care a fost evaluată influența lor asupra calității canalului din Figura 2.3 și Figura 2.4. Un contor de etalon având eroarea $e < 0,05\%$ [10] a fost utilizat pentru a verifica validitatea măsurătorilor de putere efectuate cu ADC pentru metrologie.

ADC-ul de metrologie măsoară curentul și tensiunea, precum și defazarea dintre ele și calculează P, Q, S și PF. S-a constatat un consum total de putere al sarcinilor $P = 246 \text{ W}$, $Q = 134 \text{ VAR}$, $S = 280 \text{ VA}$ și $PF = 0.88$.

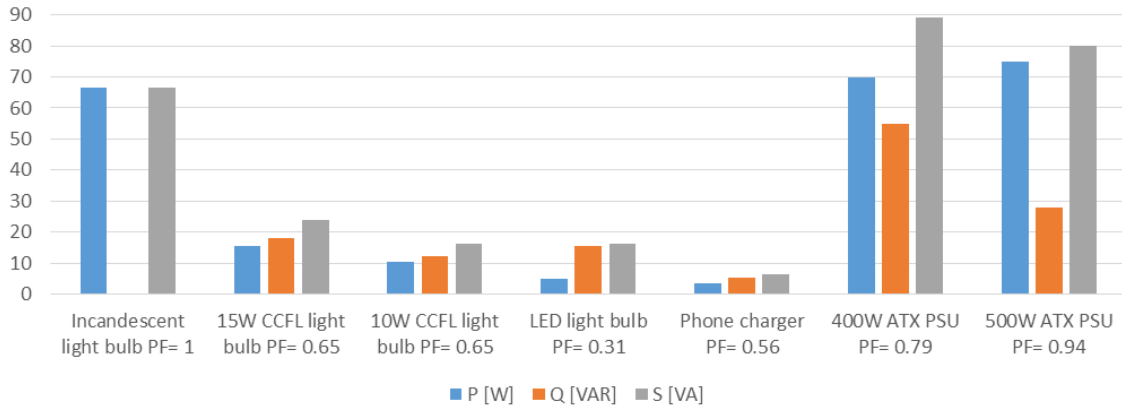


Figura 2.5 Măsurătorile de putere ale celor șase consumatori care generează CE

3 PLF pentru îmbunătățirea PLC

PLF pasive sunt folosite pentru a filtra CE din rețeaua de energie [11]–[13] sau pentru a izola diferite segmente de rețea PLC [14]. Cercetarea efectuată în acest domeniu servește ca o resursă informațională aprofundată pentru dezvoltarea și evaluarea PLF-urilor pentru aplicațiile de filtrare NB-PLC.

Studiul discutat în acest capitol sugerează, de asemenea, o metodă nouă pentru proiectarea și simularea filtrelor de linie prin utilizarea parametrilor S. Deși parametrii S au fost utilizați în metodologiile de proiectare și simulare [15], [16], prezenta cercetare este o premieră, ce propune această strategie pentru a proiecta un PLF pentru aplicații NB-PLC.

S-a creat un PLF pasiv de ordinul 13 pentru a arăta eficiența tehnicilor de proiectare propuse. Sub 150 kHz, acest filtru prezintă o atenuare semnificativă de -130dB la 50kHz menținând o impedanță de intrare și ieșire de $3,36 \Omega$, utilizând totuși doar 597 mW de putere.

Cu ajutorul acestor rezultate, subliniez beneficiile și posibilitățile utilizării metodelor de proiectare și testare propuse pentru proiectarea filtrelor de linie care prezintă caracteristici bune în ceea ce privește atenuarea, putere consumată și caracteristicile de impedanță.

3.1 Integrarea filtrelor de linie, topologii de PLF și impactul lor în rețeaua de energie electrică

În această secțiune sunt prezentate variantele de filtre de linie, caracteristicile lor cât și interferențele care pot apărea între filtre și alte servicii din rețea.

Figura 3.1 ilustrează cele două variante de amplasare ale filtrelor de linie în rețeaua de alimentare cu energie electrică:

- Amplasat în blocul de măsură și protecție al contorului, ideal între SM și siguranța principală, pentru a filtra CE produs de echipamentele folosite de consumator [17]. Instalarea filtrelor după siguranța principală este posibilă atâta timp cât există împământare sau dacă siguranța principală nu este diferențială. Cu toate acestea, dacă siguranța principală este diferențială sau filtrul de linie este diferențial, are nevoie de o conexiune la împământare, amplasarea filtrului după siguranța

principală poate duce la declanșarea ei. În Figura 3.1, această variantă de utilizare a filtrului este desemnată ca PLF Type 1.

- În scopul împărțirii SM-urilor conectate la aceeași ramură a rețelei electrice în două zone PLC. Separarea în două secțiuni asigură că fiecare SM care utilizează NB-PLC se conectează la concentratorul de date corespunzător. Când multe SM-uri sunt conectate la o ramură și este instalat un concentrator de date suplimentar pentru a crește debitul, această variantă de instalare PLF este utilă [14]. În Figura 3.1 această variantă de utilizare a filtrului este notată ca PLF Type 2.

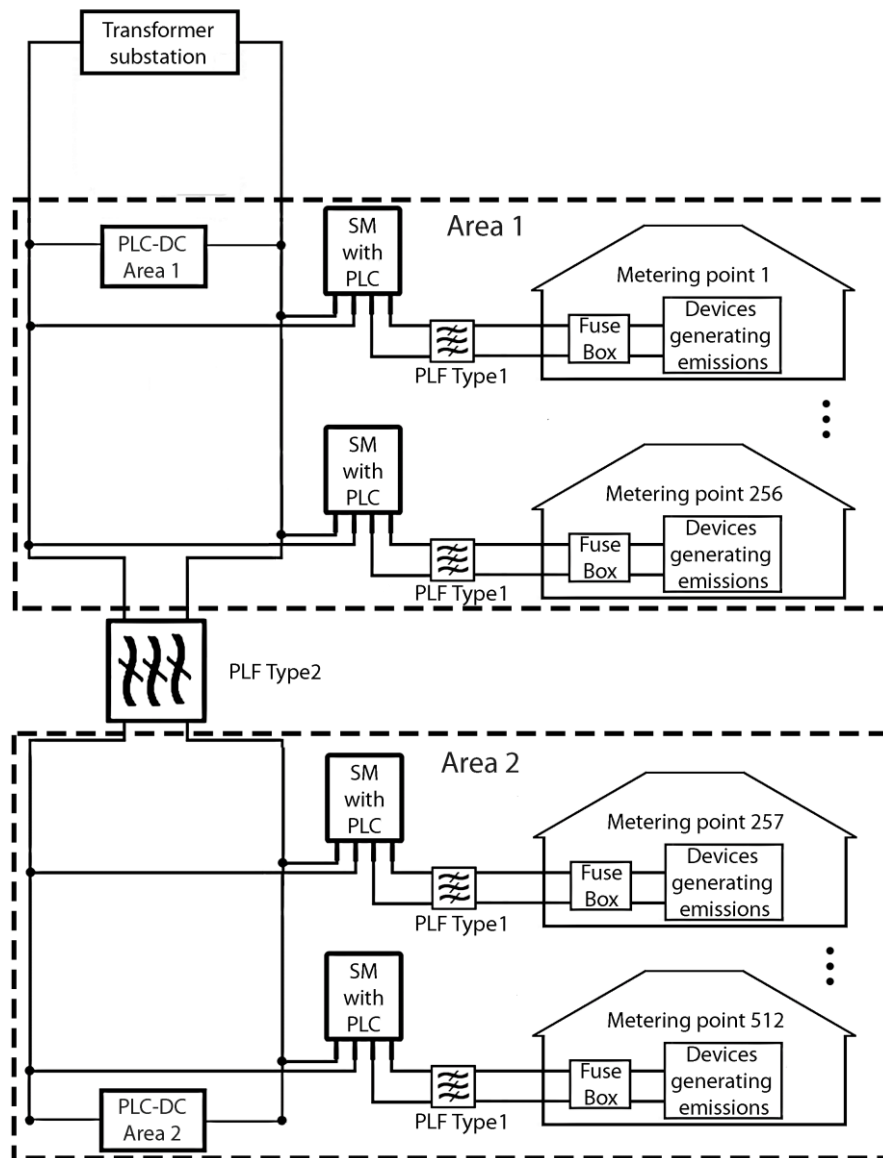


Figura 3.1 Integrarea PLF în rețea [18]

3.2 Proiectarea filtrului de linie

Proiectarea PLF a fost făcută după următoarele cerințe:

- Atenuare minimă de -120 dB la 50 kHz pentru a bloca eficient semnalul PLC, având în vedere nivelul maxim al semnalului PLC de 120 dB μ V [19].
- Optimizarea consumului de energie.

- Curent nominal de cel puțin 30 A pentru a permite instalarea ca PLF de tip 2 între SM și rețeaua electrică a clădirii.
- Pentru a preveni interferența cu PLC, impedanța de intrare/ ieșire mare în banda de frecvență NB-PLC. Impedanța ar trebui să fie mai mare de 2Ω ca o cerință minimă, deoarece modemurile PLC sunt construite și verificate pentru a transmite pe 2Ω [19].
- Proiectarea PLF și alegerea componentelor acestuia trebuie făcute într-un mod care să faciliteze conformitatea cu testele enumerate în Secțiunea 4.3 a tezei și orice alte specificații de testare.

Pe baza specificațiilor de mai sus, s-a creat un PLF de ordinul 13 prezentat în Figura 3.2.

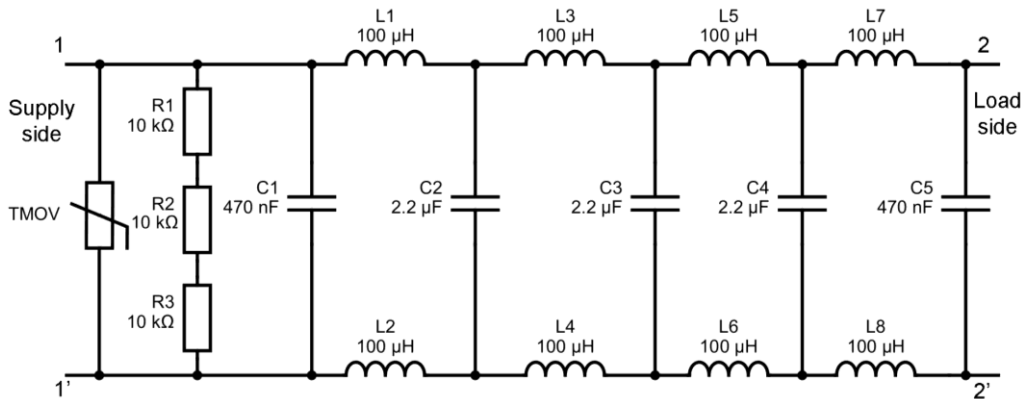


Figure 3.2 Filtrul de linie proiectat

Filtrul proiectat prezintă un set de proprietăți superioare în comparație cu trei filtre prezente pe piață, care sunt descrise ca fiind pentru aplicații NB-PLC:

- cea mai mare atenuare în banda de frecvență NB-PLC (peste -130 dB) în comparație cu cel mai bun PLF disponibil comercial (-40 dB).
- consum de energie de numai 597 mW comparabil cu celelalte filtre.
- a doua cea mai bună impedanță de intrare și ieșire de $3,36 \Omega$ în banda de frecvență între 36 kHz și $90,6 \text{ kHz}$.

Filtrul de linie proiectat este adecvat ca un PLF de tip 1, dar nepotrivit ca un PLF de tip 2 pentru separarea a rețelei electrice în două zone PLC, din cauza curentului nominal maxim de 30 A . Pe viitor, se dorește dezvoltarea unui PLF de tip 2 folosind tehnicile abordate în acest capitol.

În plus, propun evaluarea mai multor filtre disponibile în comerț folosind metodele de testare prezentate în secțiunile 4.2 și 4.3 ale tezei de doctorat. Este de interes proiectarea și testarea unui PLF hibrid, care combină tipurile de filtre rezonante și convenționale cu scopul de a reduce ordinea filtrului și păstrând în același timp o atenuare suficientă sub 150 kHz .

4 Concluzii, contribuții și direcții viitoare de cercetare

În acest capitol prezint o sinteză a cercetării metodelor de îmbunătățire a PLC-urilor prin rețele de joasă tensiune. Capitolul debutează prin a abordarea ipotezelor inițiale, care au ghidat activitatea de cercetare, oferind răspunsuri concise și care să evidențieze obiectivele de bază ale studiului. Ulterior sunt aprofundate contribuțiile teoretice și practice generate de această cercetare, evidențiind contribuțiile atât teoretice cât și practice. În plus, sunt ilustrate căi potențiale pentru lucrări și cercetări viitoare, deschizând calea pentru continuarea cercetării și a progresului în domeniu.

4.1 Concluzie

Importanța cât și implementarea pe scară largă a NB-PLC în aplicațiile SG este clară dar cu toate acestea, există lacune existente în standardizare. Coexistența dispozitivelor conectate la rețea care funcționează la frecvențe sub 150 kHz, precum și modalități practice insuficiente de a aborda problemele de comunicare NB-PLC care apar datorită faptului că rețeaua de distribuție a energiei nu a fost destinată comunicării. Acești factori subliniază importanța abordării acestor probleme pentru a asigura o comunicare optimă între dispozitivele SG. Pe măsură ce cererea pentru tehnologii SG continuă să crească, devine necesar să se reducă aceste lacune și să se sporească fiabilitatea și eficiența NB-PLC în aplicațiile SG. Întregul potențial al SG-urilor poate fi deblocat, permițând o gestionare modernă a rețelei de energie electrică și contorizare inteligentă.

Prima direcție de cercetare a introdus o metodă de identificare a consumatorilor care generează zgomot în banda de frecvență PLC. Prin corelarea măsurătorilor de putere ale consumatorilor cu rapoartele de calitate a canalului obținute de la modemul PLC-G3, a fost posibilă identificarea sarcinilor care generează CE. Această conexiune permite crearea unui program de transmisie PLC bazat pe funcționarea consumatorilor care generează CE. Rezultatele practice au arătat eficacitatea acestei metode, subliniind potențialul ei de implementare în lumea reală și îmbunătățirea performanței sistemului PLC.

A doua abordare s-a concentrat pe dezvoltarea și evaluarea filtrelor de linie, vizând în special benzile de comunicații CENELEC A, B, C și D. S-a proiectat un PLF folosind metode de simulare și componente pasive. Au fost prezentate informații detaliate despre selecția componentelor și proiectarea PLF. Valorile simulate au fost validate prin măsurători practice, confirmând metoda de proiectare. Evaluarea comparativă cu filtre comerciale a arătat că filtrul proiectat în prezenta lucrare a depășit alte filtre de linie, prezentând caracteristici excepționale: atenuare semnificativă la 50 kHz și consum redus de energie cât și o impedanță de intrate/ ieșire suficient de mare. Filtrul proiectat, deși potrivit ca un PLF de tip 1, servește ca bază pentru proiectarea unui PLF de tip 2 pe viitor folosind metodologiile prezentate în această teză.

La sfârșitul activităților de cercetare, am putut răspunde la întrebările ridicate linițial, în secțiunea 1.4:

1. Cum și de ce este PLC integrat în rețeaua electrică?

Am prezentat în secțiunile **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.** din teza de doctorat cum și de ce este folosit PLC ca și protocol de comunicație în rețeaua de alimentare cu energie electrică. Rețeaua de alimentare cu energie electrică este răspândită și ajunge în locuri greu accesibile ceea ce o face atractivă ca și mediu de comunicație pentru smart grid făcând PLC un mod de comunicație atractiv din punct de vedere tehnic și economic între contor și concentratorul de date.

2. Care sunt problemele cu care se confruntă PLC în rețeaua de distribuție a energiei electrice?

Rețeaua de alimentare cu energie electrică prezintă nivele de CE comparabile cu semnalul PLC, ceea ce duce la scăderea calității comunicației PLC. Principalele surse de CE identificate sunt: zgomot impulsiv provenit de la echipamente care se alimentează din rețea și zgomot provenit de la emițătoarele radio. Aceste aspecte sunt prezentate în secțiunile 2.2.3 din teza de doctorat și în articolul [4].

3. Există vreo modalitate de a rezolva aceste probleme fără nicio modificare a rețelei electrice? Cum se implementează această tehnică de îmbunătățire neinvazivă?

În capitolul 3 din teza de doctorat și articolul [4] este propusă o metodă inovatoare pentru identificarea sarcinilor care funcționează și introduc zgomot în banda de frecvență PLC. Această abordare utilizează componente și funcționalități deja existente în contoarele inteligente pentru a stabili o corelație între măsurătorile de putere ale consumatorilor și rapoartele de calitate a canalului obținute de la modemul PLC-G3. Se permite astfel identificarea sarcinii generatoare de CE sau crearea unui program de transmisie atunci când sarcina nu produce CE (este oprită sau în alt mod de funcționare).

4. Ce modificări ar putea fi necesare în rețeaua electrică? Cum se implementează aceste modificări?

La o primă evaluare cea mai accesibilă variantă de a filtra CE este un filtru trece jos dar proiectarea lui trebuie să ofere atenuare mare, sub 150 kHz (unde funcționează NB-PLC) și să nu influențeze comunicația PLC dorită și alte servicii prezente în rețea. Din evaluările mele trei dintre cele mai reprezentative filtre din comerț îndeplinesc doar parțial aceste cerințe.

Secțiunea 4.1 a tezei aprofundează integrarea PLF-urilor în rețeaua electrică, explorând topologia PLF și impactul acesteia asupra serviciilor din rețea. În secțiunea 4.4 este propusă o metodologie nouă pentru proiectarea PLF-urilor, în mod particular pentru NB-PLC folosind parametrii S. Această abordare inovatoare urmărește cerințele impuse de caracteristicile rețelei electrice și de banda de frecvență utilizată pentru comunicarea NB-PLC.

4.2 Contribuții teoretice

Această secțiune prezintă contribuțiile teoretice aduse pe parcursul studiilor de doctorat:

1. Provocări ale NB-PLC în contextul smart grid.

Am identificat necesitatea de a evita sau de a filtra emisiile conduse, care afectează comunicarea NB-PLC, împreună cu identificarea surselor, varietăților și caracteristicilor emisiilor conduse sub 150 kHz. De asemenea, am identificat lacune de standardizare ale emisiilor conduse care afectează NB-PLC. Rezultatele acestei analize sunt prezentate în secțiunea **Error! Reference source not found.** din teză. Aceste provocări au fost publicate în [4], [18].

2. Identificarea arhitecturii contoarelor inteligente în contextul protocoalelor și serviciilor de comunicații prezente în rețeaua electrică.

În Figura 2.1 este propusă o arhitectură de contor inteligent, care este potrivită pentru implementarea tehnicilor de identificare și evitare ale emisiilor conduse. Arhitectura a fost dezvoltată folosind componente electronice disponibile comercial și în conformitate cu standardele internaționale. Această arhitectura a fost dezvoltată incremental și prezentată în următoarele articole [4], [7], [8], [20].

3. Tehnici de identificare ale emisiilor conduse în banda de frecvență folosită de NB-PLC

În secțiunea 2.1 a rezumatului propun o metodă inovatoare pentru identificarea sarcinilor care funcționează și introduc zgomot în banda de frecvență PLC. Această abordare utilizează componente și funcționalități existente în contoarele inteligente pentru a stabili o corelație între măsurătorile de putere ale consumatorilor și rapoartele de calitate ale canalului de comunicație, obținute de la modemul PLC-G3. Se permite astfel identificarea sarcinii generatoare de emisii conduse sau crearea unui program de transmisie atunci când sarcina nu emite emisii conduse (este oprită sau în alt mod de funcționare). Această metodă nouă a fost publicată în articolul [4].

4. Tehnici de filtrare ale emisiilor conduse și prezentare generală a integrării filtrelor pasive în rețeaua electrică

În cazul în care sarcinile generatoare de emisii conduse nu pot fi evitate, ar trebui folosite tehnici de filtrare. Pentru a înțelege criteriile pentru evaluarea filtrelor pasive de joasă tensiune, a fost efectuată o documentare bibliografică extinsă. Această documentare a relevat două metode de conectare a filtrelor pasive în rețeaua de alimentare cu energie electrică de joasă tensiune: între contor și siguranța principală și între două segmente ale rețelei de alimentare. Aceste contribuții au fost prezentate în secțiunea 4.1 din teza de doctorat și în articolele [18], [20].

5. Teste de performanță, siguranță și imunitate care ar trebui incluse în procesul de evaluare ale filtrelor de linie.

În secțiunile **Error! Reference source not found.** and **Error! Reference source not found.** din teză sunt propuse metode de evaluare ale filtrelor care să permită următoarele tipuri de măsurători: atenuarea semnalului PLC, măsuratori de impedanță și evaluarea eficacității filtrului cu ajutorul modemului PLC. Principala îmbunătățire adusă bancului de test a fost simularea unei impedanțe de 2Ω , ceea ce este o aproximare bună a impedanței rețelei de alimentare cu energie electrică. Aceste metode de evaluare au fost prezentate în articolul [18].

6. Metode de proiectare și simulare ale filtrelor de linie.

În secțiunile **Error! Reference source not found.** and **Error! Reference source not found.** din teza de doctorat se propune folosirea parametrilor S cât și a programului RFSim99 pentru a proiecta și simula filtrul. Aceste metode de proiectare nu sunt noi, dar este pentru prima dată când sunt folosite pentru a proiecta filtre de linie pentru aplicații de până în 150kHz. Metodele de proiectare au putut fi aplicate pentru că aparatele de măsurare ale parametrilor-S au evoluat, permițând măsurători la frecvențe destul de joase. Aceste metode au fost prezentate în articolul [18].

4.3 Contribuții practice

Pentru validarea contribuțiilor teoretice aduse acestui domeniu de cercetare, am realizat o serie de experimente în condiții de laborator care au reprodus îndeaproape condițiile din rețea. Această secțiune enumeră progresele practice pe care le-am realizat în acest domeniu de specialitate prin cercetările întreprinse în timpul studiilor mele de doctorat:

1. Măsurători ale emisiilor conduse în banda de frecvență alocată NB-PLC.

Am efectuat măsurători pentru a sublinia și a cuantifica efectul emisiilor conduse generat de sarcinile din rețea asupra semnalului PLC. Rezultatele măsurătorilor au arătat că identificarea și evitarea emisiilor conduse și/ sau tehnicile de filtrare sunt un subiect de cercetare valid. Rezultatele măsurătorilor sunt vizibile în Figura 3.7 din teză iar acest subiect este de asemenea prezentat în articolul meu [4].

2. Impactul dispozitivelor care generează zgomot condus asupra comunicării PLC.

Figura 2.3 împreună cu Figura 2.4 prezintă influența a șase sarcini uzuale care generează zgomot asupra semnalului PLC. Rezultatele relevă faptul că sarcinile conectate în proximitatea

SM și pe același circuit electric influențează calitatea canalului de comunicație prin valori scăzute de SNR și RSSI. Rezultatele au fost validate în articolul [4].

3. Validarea practică a conceptului de identificare a sarcinilor care generează emisii conduse în banda de frecvență utilizată de NB-PLC prin corelarea datelor de calitate a canalului PLC și a măsurătorilor de putere pentru identificarea sarcinilor generatoare de emisii conduse și determinarea orarului optim de comunicare.

Subcapitolele **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.** din teza de doctorat prezintă activitățile de validare pentru stabilirea fezabilității corelării informațiilor despre calitatea canalului PLC cu măsurătorile de putere cu scopul detectării sarcinilor care generează emisii conduse în banda de frecvență alocată NB-PLC. Aceste rezultate au fost validate în articolul meu [4].

4. Implementarea unei arhitecturi de smart meter îmbunătățite capabilă să detecteze sarcini care generează emisii conduse în banda de frecvență NB-PLC.

În secțiunea **Error! Reference source not found.** se propune o variantă îmbunătățită de SM față de versiunea prezentată în subcapitolul 2.1 din sumar. Motivația principală din spatele dezvoltării conceptului smart meter îmbunătățit a fost investigarea potențialei interferențe între tehnologia mSure™ utilizată de către integratul de metrologie și PLC. Această arhitectură îmbunătățită a fost prezentată în articolul [20] care este o evoluție a arhitecturilor folosite în articolele [4], [9], [21].

5. Implementarea și evaluarea unui PLF pasiv pentru banda de frecvență NB-PLC.

Filtrul pasiv de ordinul al 13-lea proiectat și implementat în această cercetare folosește componente atent selectate, astfel încât să ofere suficientă atenuare pentru a bloca CE și semnalul PLC, în timp ce prezintă o impedanță suficient de mare la ambele capete, astfel încât să nu perturbe comunicarea PLC utilă. Proiectarea acestui filtru este prezentă în subcapitolele **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.** din teză cât și în articolul [18].

6. Compararea filtrului de rețea proiectat cu cele care se află în prezent pe piață.

Filtrul proiectat prezintă un set de proprietăți superioare în comparație cu trei filtre prezente pe piață care sunt descrise ca fiind pentru aplicații NB-PLC:

- cea mai mare atenuare în banda de frecvență NB-PLC (peste -130 dB) în comparație cu cel mai bun PLF disponibil comercial (-40 dB),
- consum de putere de numai 597 mW comparabil cu celelalte filtre
- a doua cea mai bună impedanță de intrare și ieșire de 3,36 Ω în banda de frecvență între 36 kHz și 90,6 kHz

Procesul de evaluare al filtrelor cât și rezultatele sunt prezentate în capitolul **Error! Reference source not found.** din teză și validate în articolul [18].

4.4 Direcții de dezvoltare suplimentare

În contextul continuării activităților de cercetare, intenționez să mă bazez pe activitățile prezentate în această teză și în articolele publicate, urmărind următoarele obiective:

- Continuarea dezvoltării conceptului SM prezentat în secțiunea 3.4 până la nivelul la care este un SM standard [22] prin adăugarea următoarelor periferice: afișaj, port optic de comunicație, butoane, relee pentru managementul sarcinii și deconectarea consumatorilor și un ceas de timp real.
- Filtrul de rețea proiectat este adecvat pentru utilizare ca PLF tip 1, dar inadecvat pentru a servi ca PLF de tip 2 (pentru izolarea a două secțiuni ale rețelei electrice) deoarece are curent nominal maxim de 30 A, așa cum se arată în secțiunea 4.1.2 din teza. Se dorește să implementarea unui PLF de tip 2 folosind tehnicile prezentate ca urmare a activității de cercetare.
- Intenționez să evaluez mai multe PLF-uri utilizând procedurile de testare detaliate în secțiunea 4.2. În plus, este interesant să se exploreze proiectarea și evaluarea unui PLF hibrid care combină tipurile de PLF rezonante și de ordinul al n-lea, având ca scop scăderea ordinii filtrului, asigurând în același timp atenuarea și impedanța potrivite pentru PLF de tip 1 și tip 2.
- Efectuarea de teste pe teren pentru a valida metodologiile de îmbunătățire a PLC-urilor pe rețelele de joasă tensiune ar trebui să fie efectuată ca rezultat final.

5 Bibliografie

- [1] "FCC ONLINE TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS." FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION OFFICE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY POLICY AND RULES DIVISION, Aug. 23, 2022. Accessed: Jul. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/file/21474/download>
- [2] "Power Line Communication Equipment (10kHz-450kHz)." Nov. 27, 2002. Accessed: Jul. 01, 2023. [Online]. Available: https://www.arib.or.jp/english/std_tr/telecommunications/desc/std-t84.html
- [3] A. Majumder and J. Caffery, "Power line communication: An overview," *Potentials IEEE*, vol. 23, pp. 4–8, Nov. 2004, doi: 10.1109/MP.2004.1343222.
- [4] S. Avram, "Power line communication channel noise source detection using smart meters," in *2016 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Oct. 2016, p. 106. doi: 10.1109/ISETC.2016.7781067.
- [5] P. Guyard, R. Fiorelli, and J. Houee, "STCOMET smart meter and power line communication system-on-chip development kit." 2017. Accessed: Aug. 01, 2023. [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4732-stcomet-smart-meter-and-power-line-communication-systemonchip-development-kit-stmicroelectronics.pdf
- [6] P. Sausen, A. Sausen, M. Campos, L. F. Sauthier, A. Oliveira, and R. Emmel, "Power Line Communication Applied in a Typical Brazilian Urban Power Network," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, May 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078697.
- [7] S. Avram, V. Plotenco, and L.-N. Paven, "Design and development of an electricity Meter Test Equipment," in *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, May 2017, pp. 96–101. doi: 10.1109/OPTIM.2017.7974954.
- [8] S. Avram, A.-M. Safta, C. Daniel Căleanu, and R. Vasiiu, "Hardware and software implementation of an embedded metering webserver," in *2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Jul. 2017, pp. 43–46. doi: 10.1109/TSP.2017.8075933.
- [9] S. Avram, C. D. Căleanu, R. Vasiiu, A.-M. Safta, and H. G. Belei, "Hardware and Software Integration of an Electrophoretic display on a smart meter," *ITM Web Conf.*, vol. 29, p. 03003, 2019, doi: 10.1051/itmconf/20192903003.
- [10] "Calmet TE30 Datasheet." Jul. 2022. Accessed: Aug. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.calmet.com.pl/images/pdf/TE30-Three-Phase-Working-Standard-Data-Sheet-EN.pdf>

- [11] V. Tarateeraseth, "EMI filter design: Part III: Selection of filter topology for optimal performance," *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 1, no. 2, pp. 60–73, Second 2012, doi: 10.1109/MEMC.2012.6244975.
- [12] D. Varajão, R. Esteves Araújo, L. M. Miranda, and J. A. Peças Lopes, "EMI Filter Design for a Single-stage Bidirectional and Isolated AC–DC Matrix Converter," *Electronics*, vol. 7, no. 11, p. 318, Nov. 2018, doi: 10.3390/electronics7110318.
- [13] K. Bernacki, D. Wybrańczyk, M. Zygmanski, A. Latko, J. Michalak, and Z. Rymarski, "Disturbance and Signal Filter for Power Line Communication," *Electronics*, vol. 8, no. 4, p. 378, Apr. 2019, doi: 10.3390/electronics8040378.
- [14] A. Vukicevic, M. Bittner, A. Rubinstein, M. Rubinstein, and F. Rachidi, "A concept to enhance system data rate for PLC access networks," in *2008 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, Jeju City, Jeju Island, South Korea: IEEE, Apr. 2008, pp. 105–110. doi: 10.1109/ISPLC.2008.4510407.
- [15] S. Liu, Y. Zhang, and D. Yu, "Research and design of EMI digital filters using scattering parameters," in *2009 International Conference on Wireless Communications Signal Processing*, Nov. 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/WCSP.2009.5371392.
- [16] P. C. Sekhar, Y. Gopal, and T. rao, "DESIGN OF S PARAMETERS FOR VARIOUS FILTERS," 2013. Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: <http://www.tjprc.org/publishpapers/--1366185303-11.-Design%20of%20s%20parameters.full.pdf>
- [17] "Blocking Filter - Grupo Premo." <https://www.grupopremo.com/content/102-blocking-filter> (accessed Aug. 01, 2023).
- [18] S. Avram and R. Vasiiu, "Passive Power Line Communication Filter Design and Benchmarking Using Scattering Parameters," *Appl. Sci.* 2023, vol. 13, no. 11, doi: <https://doi.org/10.3390/app13116821>.
- [19] "EN 50065-1:2011 - Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz. General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances." Accessed: May 07, 2019. [Online]. Available: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030235497>
- [20] S. Avram, R. Vasiiu, D. Chiciudean, L.-N. Paven, and M. L. Crauciuc, "Hardware and Software Implementation of a Self-Calibrating Smart Meter with Tamper Detection," in *2021 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, Oct. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/CIEM52821.2021.9614900.
- [21] S. Avram, A.-M. Safta, C. Căleanu, and R. Vasiiu, "Hardware and software implementation of an embedded metering webserver," Jul. 2017, p. 46. doi: 10.1109/TSP.2017.8075933.
- [22] "EN 50470-1:2006+A1:2018 Electricity metering equipment (a.c.). General requirements, tests and test conditions. Metering equipment (class indexes A, B and C)." Accessed: May 28, 2019. [Online]. Available: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=00000000030361398>