

## ETALONAREA CANALELOR DE TRANSMISIE CU FIBRA OPTICA DIN TRANSFORMATOARELE ELECTRONICE DE MASURARE A CURENTULUI

**Marinel Popescu, Alexandru Manta**  
**Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare și Încercări pentru Electrotehnica,**  
**ICMET Craiova, România**  
**marinel\_popescu@yahoo.com, alexandru\_manta@yahoo.com**

**Abstract.** *Precise measurement of currents and voltages in the presence of intense electric and magnetic fields requires to adjust transmission channel parameters.*

*The best results are obtained if the measuring signal is converted into frequency modulated signal and it is transmitted through fiber optic link from measurement point to monitoring point. The paper presents the working principle and structure of a instrument current transformer and the method for adjusting the parameters of transmission channel.*

**Cuvinte-cheie:** *etalonare, canal de transmisie, transformator de curent, fibra optica, dreapta de regresie.*

### I. Introducere

Transformatoarele de curent care funcționează pe baza legii inducției electromagnetice au fost mult timp singurele mijloace utilizate pentru realizarea funcțiilor de măsurare și protecție (transformatoarele de măsurare și protecție clasice). De aceea, atât principiul de funcționare cât și tehnologiile de fabricare sunt foarte bine cunoscute de către specialiști.

Realizarea transformatoarelor de curent pentru tensiuni nominale joase nu ridică probleme de proiectare, realizare și exploatare. În schimb, pentru realizarea transformatoarelor de curent cu tensiuni nominale medii sau înalte se impun măsuri speciale de asigurare a izolării între înfășurările transformatorului și între acestea și caile de transmitere a semnalului de măsurare. Pentru aceasta se utilizează hârtie electrotehnica, ulei mineral, izolatori ceramici care fac să rezulte o construcție voluminoasă, greoaie, greu de transportat, manipulat și montat.

Odată cu dezvoltarea cercetărilor interdisciplinare și a colaborării dintre inginerii specializați în tehnica tensiunilor înalte, a echipamentelor de mare putere, în electronica, în tehnologia informației, în utilizarea și programarea minicontrolerelor și a calculatoarelor, în fizica corpului solid și a fenomenelor optice în medii omogene s-au creat premisele obținerii de alternative pentru mijloacele clasice de măsurare.

Tendențele de dezvoltare și modernizare a transformatoarelor de măsurare clasice au încercat, rând pe rând, să vină cu îmbunătățiri în ceea ce privește comportarea în regim dinamic și atenuarea efectelor apariției fenomenului de saturație. S-a încercat reducerea gabaritului, a pericolului de explozie și de incendiu și creșterea fiabilității, a imunității la perturbații și a gradului de izolare al cailor de transmitere a semnalelor de măsurare. De asemenea, s-a încercat dezvoltarea de mijloace de măsurare mai complexe pentru extragerea și prelucrarea întregului volum de informație conținut de semnalele de măsurare generate de transformatoare de măsurare a curenților în regim deformant.

S-au obținut transformatoarele de curent electronice (ECT-Electronic Current Transformer) cu două grupe mai importante: transformatoarele de curent optice (OCT-Optical Current Transformer) care aduc în atenție fenomene interesante de acțiune a câmpului magnetic asupra luminii polarizate și transformatoarele de curent cu consum de putere redus (LPCT-Low Power Current Transformer) care au ca secundar înfășurări fără miez magnetic (cordoanele Rogowski).

Transformatoarele de curent optice funcționează pe baza efectului magneto-optic (efectul

Faraday). Curentul de măsurat străbate o bobina care are ca miez un mediu optic străbătut de un fascicul de lumina plan-polarizata. Câmpul magnetic produs de curentul de măsurat in mediul optic rotește planul de polarizare al fasciculului cu un unghi proporțional cu inducția câmpului magnetic creat de curent și cu lungimea mediului optic. Acest tip de transformator este sensibil la variațiile temperaturii mediului ambiant [1].

Transformatoarele de curent cu cordon Rogowski necranat sunt sensibile și la influente ale câmpurilor electromagnetice perturbatoare produse de alte surse decât curentul de măsurat [2].

Cele doua tipuri de transformatoare prezentate anterior au preturi mai ridicate decât cele clasice. Ca urmare, pana la rezolvarea problemelor tehnice și la reducerea prețului transformatoarelor electronice s-au căutat soluții pentru realizarea unor "transformatoare de tranziție", obținute prin combinarea transformatorului clasic cu module electronice de condiționare și prelucrare a semnalelor cu scopul transmiterii acestora prin fibra optica de la punctul de măsurare (aflat la potențial înalt) la punctul monitorizare (aflat in sala de comanda a stației electrice).

In lucrare se prezintă un transformator de măsurare care utilizează un senzor de curent clasic ce generează la bornele rezistentei de sarcina o tensiune de 150 mV la curentul nominal primar. Semnalul de măsurare generat este modulată in frecventa și transmis ca semnal optic prin fibre de la punctul de măsurare la cel de monitorizare. Sunt prezentate principiul de funcționare, rezultate experimentale obținute in timpul testelor pre și postetalonare și metoda de etalonare pentru obținerea dreptei de regresie și a coeficienților de ajustare a caracteristicii statice.

## II. Principiul de funcționare. Prezentarea modelului fizic.

Soluția tehnica adoptata pentru realizarea transformatorului are in vedere condițiile de funcționare impuse de utilizarea lui in circuite de medie și mare tensiune. S-a considerat adecvata o structura formata din doua unitari modulare interconectate prin fibra optica. Prima unitate se montează in punctul de măsurare aflat la potențial înalt și are rolul de a genera semnalul de măsurare, de a-l condiționa și a-l converti electro-optic pentru transmiterea prin fibra optica. Semnalul optic obținut este modulată in frecventa de către semnalul de măsurat, cu amplitudinea proporționala cu cea a curentului primar.

Cea de-a doua unitate se montează in punctul de monitorizare din camera de comanda și are rolul de converti opto-electric semnalul recepționat prin fibra optica și de a extrage semnalul de măsurare din succesiunea de impulsuri modulate in frecventa. O prezentare in detaliu poate fi găsită in [3].

Ansamblul este echivalent cu o structura de reglare cu urmărirea referinței (prescrierii) generata de elementul de prescriere EP sub influenta mărimii de măsurat  $m$  (fig.1.). Mărimea de măsurat sau măsurandul,  $m$ , este curentul ce străbate bara sau linia care constituie circuitul primar al transformatorului.

Transformatorul prezentat a fost realizat ținând seama de recomandările standardului IEC 60044-8. La bornele senzorului de curent se obține tensiunea  $U_s=150$  mV la curentul nominal primar,  $I_{1n}=200$  A, iar valoarea efectiva a tensiunii la ieșire corespunzătoare este  $U_e=4$  V (fig.2.).

Semnalul  $u_s$ , generat de secundarul transformatorului TC când primarul este străbătut de curentul de măsurat  $i_m$ , este amplificat de amplificatorul de instrumentație (AI) care-l furnizează ca semnal de comanda pentru oscilatorul comandat cu tensiune (OCT) pentru realizarea modulației in frecventa. Succesiunea de impulsuri cu frecventa variabila generata de OCT comanda driverul logic (DL) și LED-ul laser (LD) care convertește semnalul electric in semnal optic. Folosind ca mediu de propagare fibra optica (FO), semnalul optic ajunge la fotodiada (FD) și la amplificatorul cu transconductanța care-l convertesc opto-electric, rezultând succesiunea de impulsuri electrice modulate in frecventa. Acest ansamblu formează elementul de prescriere (EP) care generează mărimea de referință cu variație similara cu cea a curentului de măsurat.

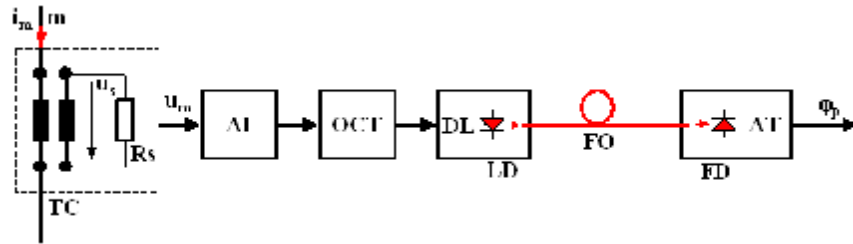


Fig. 1. Schema bloc a elementului de prescriere al sistemului de reglare cu urmărirea referinței.

Sistemul de reglare este o format dintr-o bucla cu calare de faza formata din elementul de comparare (EC, comparatorul de faza -CF), filtrul trece-jos (FTJ) si oscilatorul comandat cu tensiune (OCT). Comparatorul de faza generează un semnal periodic cu factorul de umplere proporțional cu diferența de faza  $\Delta\varphi$  dintre faza semnalului de referința ( $\varphi_p$ ) si faza semnalului de reacție ( $\varphi_r$ ) generat de OCT. Valoarea medie a semnalului  $u_{FTJ}$  se modifica astfel încât  $\varphi_r$  sa se apropie de  $\varphi_p$ . Semnalul  $u_{FTJ}$  este obținut la ieșirea buclei prin demodularea impulsurilor electrice primite de la EP si constituie imaginea semnalului de măsurare care este amplificat de A2 si adaptat, ca putere, de Ad.

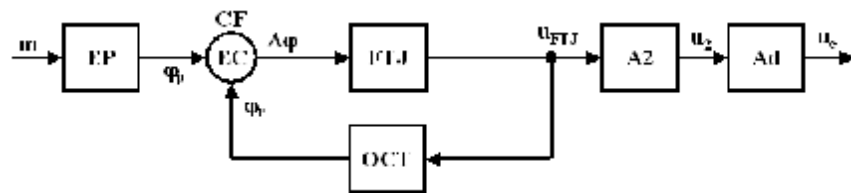


Fig.2. Schema bloc a sistemului de măsurare cu calare de faza.

Modelul fizic al transformatorului este prezentat în fig.3. Unitatea modulara ce funcționează la potențial ridicat include transformatorul de măsurare și modulele electronice de amplificare, conversie tensiune-frecvența și conversie electro-optica. Este montată în cutia metalică fixată la partea superioara a unui izolator din material compozit.

Energia necesară alimentării modulelor este generată prin inducție in secundarul unui alt transformator plasat pe calea de curent. La valori mici ale curentului de sarcina al liniei alimentarea este asigurata de o baterie de acumulatori. Cea de-a doua unitate, destinata camerei de comanda, este montata in cutie metalica echipata cu priza si cablu pentru alimentarea de la rețeaua de joasa tensiune. Cele doua unități și fibră optică au conectori optici tip ST.

Pentru verificarea funcționării canalului de transmitere a semnalului de măsurare au fost utilizate fibre optice cu lungimi cuprinse între 20 m si 600 m, prin care s-au transmis semnale optice cu lungimea de unda de 850 nm



Fig.3. Modelul fizic al transformatorului de măsurare cu construcție modulară

### III. Etalonarea canalului pentru transmiterea semnalului de măsurare

În structura din fig.1. transformatorul TC a fost înlocuit cu un calibrator Fluke 5500 pentru a genera semnalul de măsurare etalon pe baza căruia să se evalueze parametrii transmisiei prin canalul cu fibra optică. Domeniul de variație al semnalului de intrare  $U_s$  (0 mV...180 mV) corespunde variației curentului primar în intervalul  $0... 1,2 I_{1n}$  și produce o variație a tensiunii de ieșire  $U_2$  în intervalul (0...4,8 V) [4].

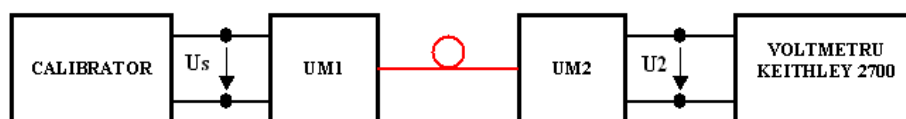


Fig.4. Schema de principiu a montajului folosit pentru etalonarea canalului de transmisie cu fibra optică

Folosind montajul din fig.4. a fost determinată caracteristica statică experimentală  $U_2=f(U_s)$  care a fost comparată cu cea teoretică pentru a determina erorile relative și corecțiile necesare. Datele obținute sunt reprezentate grafic în caracteristica erorii relative  $\varepsilon$  în funcție de tensiunea  $U_s$ , generată de curentul de măsurare, (scatterul din fig.5). Caracteristica experimentală este plasată între caracteristicile limita admise de standardul IEC 60044-8 pentru clasa de precizie 0,5. Valorile experimentale sunt, în general, bine distribuite, corecțiile fiind necesare la valori mici ale curentului măsurat.

Ajustarea parametrilor canalului de transmisie pentru plasarea caracteristicii din fig.5. în poziție optimă față de limitele superioară și inferioară admise constituie scopul principal al dezvoltării prezentată în continuare. Optimizarea valorilor câștigului și offsetului pentru obținerea unei erori de măsurare cu valoarea minim posibilă în tot domeniul se poate face utilizând criteriul celor mai mici pătrate prin care se obține caracteristica de mai sus în forma optimă: dreapta de regresie a seriei de valori obținute experimental.

Bazele teoretice ale criteriului de optimizare sunt prezentate în mai multe referințe bibliografice [5], [6]. Esența și scopul metodei dezvoltată pentru realizarea criteriului de optimizare este aceea de a găsi dreapta care reprezintă cea mai bună aproximare a dependentei liniare dintre  $\varepsilon$  și  $U_s$  pe baza rezultatelor oferite de seria de valori experimentale.

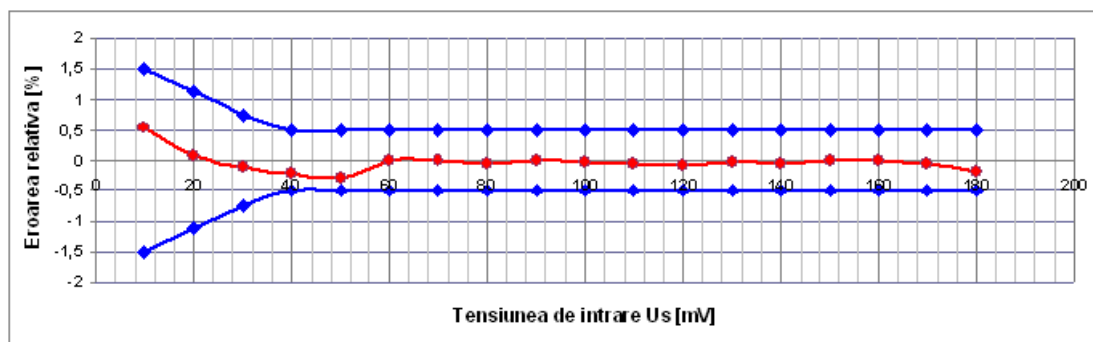


Fig.5. Reprezentarea grafica a erorii relative  $\varepsilon$  în funcție de tensiunea de intrare  $U_s$  a transmisiei cu fibra optica.

Ecuția dreptei căutate are forma:

$$\varepsilon = aU_s + b \quad (1)$$

În care coeficienții  $a$  și  $b$  se calculează folosind datele din caracteristica experimentală incluse în relațiile de mai jos:

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_1 + \dots + x_n y_n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = y_1 + y_2 + \dots + y_n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \quad (5)$$

$$y = ax + b \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{n(\sum_{i=1}^n [x_i y_i]) - (\sum_{i=1}^n [x_i]) (\sum_{i=1}^n [y_i])}{n(\sum_{i=1}^n [x_i^2]) - (\sum_{i=1}^n [x_i])^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \alpha(\sum_{i=1}^n [x_i])}{n} \quad (8)$$

Pornind de la relațiile de mai sus a fost sintetizată o schemă de calcul folosind mediul de dezvoltare LabView. Schema bloc rezultată este reprezentată în fig.6. Datele caracteristicii experimentale sunt considerate componente constante a doi vectori. Vectorul mărimii de intrare  $\mathbf{X}(x_i, i=1, \dots, n)$ , conține valorile tensiunii  $U_s$  cuprinse în domeniul de măsurare al transformatorului. Vec-

torul mărimii de ieșire  $Y(y_i, i=1, \dots, n)$  conține valorile mărimii de ieșire care poate fi considerată tensiunea de ieșire sau amplificarea sistemului sau eroarea relativă determinată.

În cadrul unui ciclu "for" componentele sunt apelate succesiv și sunt utilizate pentru determinarea sumelor parțiale și a coeficienților  $a$  și  $b$ . Execuția programului pentru calculul coeficienților  $a$  a avut ca rezultat valorile  $a = -0,000927245$  și  $b = -0,0565882$ . Fig.7. conține reprezentarea grafică a caracteristicii (ec). Valoarea coeficientului  $b$  (intercept) conduce la concluzii referitoare la modificarea offset-ului, iar valoarea lui  $a$  (panta) oferă informații pentru corectarea amplificării.

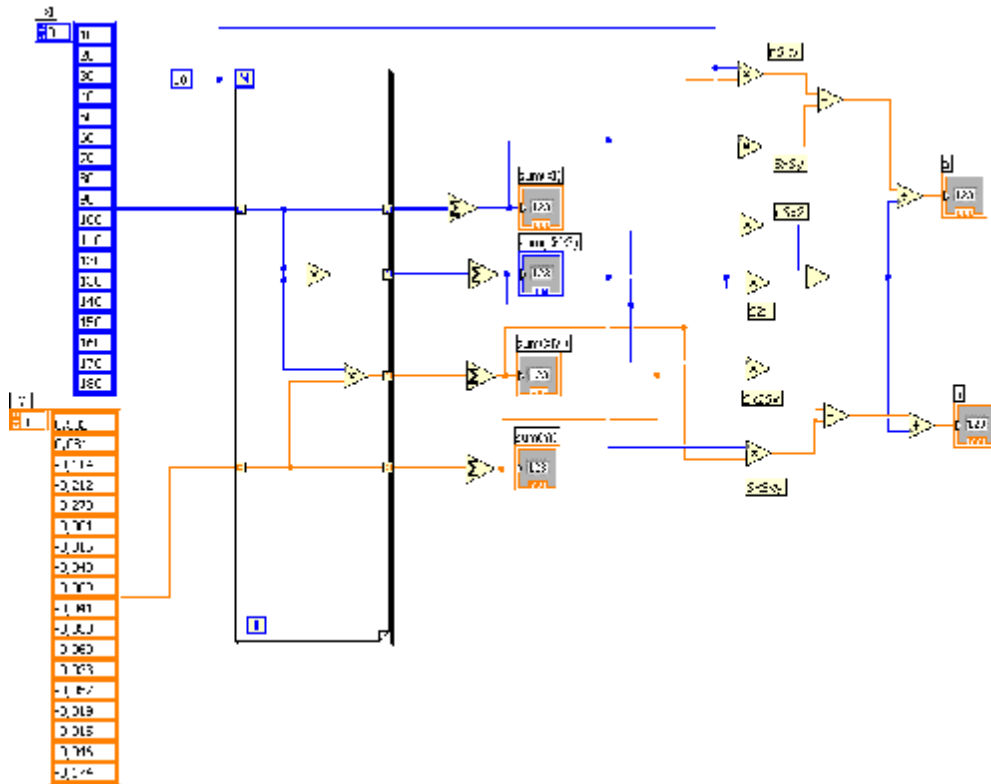


Fig.6. Schema bloc utilizată pentru determinarea coeficienților  $a$  și  $b$  folosind mediul LabView

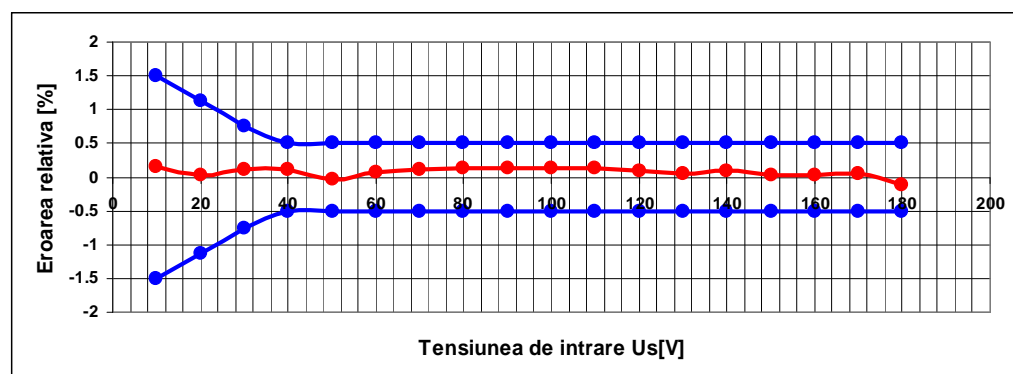


Fig.7. Eroarea relativă a transformatorului după etalonarea canalului cu fibra optică

Utilizarea informațiilor obținute în urma aplicării criteriului de optimizare a condus la ajustarea parametrilor canalului de transmitere a semnalului de măsurare. Întregul ansamblu al transfor-

matorului de măsurare a fost supus testelor de verificare a erorilor de amplitudine și de fază. S-a utilizat metoda comparației rezultatelor măsurării cu cele ale unui transformator de măsurare etalon. Circuitele primare ale celor două transformatoare, conectate în serie, au fost alimentate de la o sursă de curent, iar semnalele de măsurare au fost achiziționate de un sistem de măsurare profesional tip MIT 300 (Mtronix). A fost parcurs tot domeniul de variație al curentului primar și au fost notate valorile erorilor indicate de software-ul aplicației care administrează funcționarea instalației de măsurare.

#### IV. Concluzii

Transmiterea semnalelor de măsurare folosind tehnica modularii în frecvență a semnalelor optice logice constituie o soluție tehnică sigură în medii în care sunt prezente câmpuri electrice sau magnetice intense. Utilizarea modulelor electronice cu posibilități de ajustare a amplificării și offsetului oferă posibilitatea de a corecta caracteristica statică a transformatorului. Precizia și stabilitatea transmisiei prin fibra optică influențează esențial performanțele transformatorului atât în regim cvasistaționar cât și în regim dinamic. Compensarea variației cu temperatura a amplificării și frecvenței oscilatorului comandat cu tensiune permite realizarea transformatorului pentru a funcționa în mediul exterior clădirilor.

Utilizarea componentelor cu consum redus de energie, adoptarea soluției autoalimentării cu tensiune indusă de linia electrică sau cu tensiunea produsă de acumulatori creează posibilitatea obținerii de unități modulare autonome care să funcționeze la potențial ridicat. Prețul de cost rezultat este comparabil cu al unui transformator clasic.

Realizat pentru tensiunea nominală de 24 kV, transformatorul are unitatea modulară pentru potențial ridicat plasată pe un izolator din material compozit, mai ușor și mai sigur de manipulat, fără ulei și hârtie electroizolantă, fapt ce reduce riscul producerii de explozii și incendii în cazul apariției defectelor.

Verificată cu ajutorul unui model experimental, soluția poate fi extinsă și aplicată la realizarea de mijloace de măsurare integrate în stații și rețele de înaltă tensiune. Rezultatele obținute conduc la concluzia că este posibil să se obțină mijloace de măsurare cu clasa de precizie 0,2 destinate măsurării în interiorul incintelor.

#### V. Referințe

1. Traian Titi Serban, Maria Brojboiu. Tendințe și perspective în dezvoltarea unei noi generații de senzori de curent pentru stații de înaltă tensiune. The 5th International Power Systems Conference, pag. 447-454, (psc71.pdf).
2. W.F. Ray, C.R. Hewson. High Performance Rogowski Current Transducers. (ias\_2000\_pem.pdf)
3. Popescu Marinel, Manta Alexandru, Paduraru Nicolae, Marinescu Andrei. OPTOELECTRONIC CURRENT TRANSFORMER FOR MEDIUM VOLTAGE NETWORKS, ICATE 2010, , OCTOBER 8-9, 2010, ISSN 2069-0150.
4. \*\*\*. IEC60044-8, Instrument transformers, Part 8, Electronic current transformers. (IEC 60044-8[1].pdf)
5. Marina Gorunescu. Regresia liniară (note de curs prezentate la Facultatea de Electrotehnică a Universității din Craiova) (<http://inf.ucv.ro/~gorunescu/en/courses/curs/8.pdf>).
6. Mariana-Elena Balu. Bazele statisticii. Editura Fundației România de Main, București, 2007. (6\_3\_1\_Regresia liniară simplă.pdf)