

ASPECTE CALITATIVE ȘI CANTITATIVE ALE FENOMENUL DE FEROREZONANȚĂ ÎN INSTALAȚIILE ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE

Emil CAZACU¹, Lucian PETRESCU¹

¹Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea POLITEHNICA București

emil.cazacu@upb.ro, lucian.petrescu@upb.ro

Rezumat. Fenomenul de ferorezonanță este generat de interacțiunea dintre dispozitivele magnetice neliniare și elementele capacitive din cadrul unei instalații electrice în care pierderile sunt reduse și care sunt alimentate în mod constant de cel puțin o sursă de energie. Ferorezonanța se manifestă prin apariția unor supratensiuni și supracurenți în instalație cu forme de undă puternic distorsionate. De asemenea, fenomenul este însoțit și de alte perturbații ale calității energiei electrice (fluctuații de tensiune, nesimetrii, zgomot, etc.), care se propagă în rețea afectând buna funcționare a întregii instalații. În plus, spre deosebire de rezonanța liniară, ferorezonanța permite manifestarea mai multor stări stabile (moduri) pentru aceiași parametri ai rețelei, acestea fiind impuse de condițiile inițiale din instalație și momentul apariției fenomenului. Cu toate că acest fenomen era mai degrabă specific rețelelor de înaltă sau medie tensiune, impunerea unor noi reglementări ce prevăd utilizarea echipamentelor electrice cu înaltă eficiență energetică, a creat condițiile apariției acestui fenomen și în instalațiile de joasă tensiune. Astfel, vulnerabilitatea la ferorezonanță a unei instalații de joasă tensiune a devenit un indicator al calității energiei electrice. Lucrarea de față prezintă o procedură de calcul și investigație a acestui fenomen bazându-se pe analiza soluțiilor numerice a sistemelor de ecuații diferențiale (neliniare și neautonome), ce modelează fenomenele tranzitorii ce inițiază apariția ferorezonanței (de regulă procese de comutație). De asemenea, sunt folosite și mijloace de investigație moderne (vizualizări 3D în planul fazelor sau diagrame Poincaré), impuse de dificultatea analizei cantitative atât în regim dinamic, cât și în regim staționar a ferorezonanței. Adițional, se propun metode și proceduri de atenuare a efectelor fenomenului de ferorezonanță asupra echipamentelor sau elementelor de rețea din instalațiile electrice de distribuție.

1. INTRODUCERE

Termenul de ferorezonanță sau rezonanță neliniară este atribuit unui fenomen oscilatoriu complex, care poate apărea într-un circuit electric, cu pierderi reduse, ce cuprinde: un element magnetic neliniar saturabil (feromagnetic), un condensator și o sursă de alimentare [1-9]. Apariția ferorezonanței este de regulă inițiată de un proces tranzitoriu

(comutația unui dispozitiv feromagnetic, înlăturarea unui defect) sau prin modificarea parametrilor sistemului (variația tensiunii de alimentare, creșterea valorii capacității sau diminuarea valorii elementelor disipative). O caracteristică specifică a ferorezonanței (spre deosebire de rezonanța liniară) este că aceasta poate prezenta mai multe moduri (stări stabile) de manifestare pentru același set de parametri ai sistemului electric [1-5]. Toate aceste moduri se manifestă prin amplitudini mari ale tensiunilor și curenților din instalație (cu mult peste cele nominale) însoțite de o distorsiune armonică semnificativă a acestora. În plus, ferorezonanța este extrem de sensibilă la parametrii sistemului (condițiile inițiale și momentul stabilirii acesteia). Astfel, pot apărea salturi bruște (sudden jumps), cunoscute și sub denumirea de bifurcații (bifurcations) între modurile ferorezonanței, care pot duce la o evoluție în timp imprevizibilă a circuitului și a întregii instalații [6, 7].

Noile dispozitivele electromagnetice cu miez de fier (transformatoare, bobine de reactanță etc.) utilizate în cadrul instalațiilor electrice sau electronice de joasă tensiune actuale, folosesc materiale magnetice (neliniare, chiar histeretice), dar cu pierderi reduse [8, 9]. De asemenea, aparatele moderne de comutație dinamică (contactoare, întrerupătoare etc.) au capacități specifice parazite de valori ridicate. Prin urmare, în cadrul instalațiilor actuale, datorită unor modificări topologice funcționale (comutații), se pot genera condițiile de apariție a fenomenului de ferorezonanță [2-7].

Trebuie menționat că ferorezonanța este una din cele mai vechi probleme de calitate a energiei electrice din instalații, făcând obiectul, de peste un secol [1-7], a numeroase studii și cercetări teoretice sau experimentale [10-19]. Din păcate, datorită caracterului său intrinsec neliniar, acest fenomen este adesea dificil de anticipat și evaluat în mod cantitativ. Prin urmare, în ultimele decenii, au fost dezvoltate instrumentele moderne de investigație, specifice ferorezonanței (bazate pe teoria sistemelor neliniare), care să permită o analiză adecvată (în profunzime) a fenomenului [1-7, 10-19]. Metodele de calcul (majoritatea dezvoltate în domeniul timp) au la bază rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale neliniare care modelează atât procesul tranzitoriu cât și cel staționar de ferorezonanță. Astfel, formele de undă ale tensiunilor și curenților sunt predeterminate și analizate în mod critic.

Metoda propusă în această lucrare a fost concepută pentru a fi aplicată studiului ferorezonanței dispozitivelor magnetice neliniare monofazate de joasă tensiune, cu o putere nominală de maxim 25 kVA. Procedura propusă are la bază descrierea adecvată a dependenței fluxului de curent pentru dispozitivul magnetic neliniar (cu ajutorul a diverse funcții analitice specifice – selectate în raport cu caracteristica materialelor magnetice) și rezolvarea numerică a sistemului de ecuații integro-diferențiale asociate procesului dinamic de inițiere a fenomenului de ferorezonanță. Se obțin astfel soluțiile în domeniul timp atât pentru regimul tranzitoriu, cât și pentru regimul staționar.

2. CARACTERIZAREA CANTITATIVĂ A FENOMENULUI DE FEROREZONANȚĂ ȘI A MODURILOR DE MANIFESTARE A ACESTEIA

Pentru ca ferorezonanța să aibă loc, un circuit trebuie să conțină cel puțin o sursă de alimentare alternativă, un element inductiv saturabil și un condensator. De asemenea, acesta trebuie să prezinte elemente disipative de energie (rezistoare) de valoare redusă. Condițiile inițiale ale circuitului, înainte de inițierea ferorezonanței (fluxul magnetic remanent în miezul

dispozitivelor magnetice, valoarea inițială a tensiunii la bornele elementelor capacitive precum și momentul comutației sau cel al modificărilor topologice în instalație) determină răspunsul circuitului și modul în care acesta atinge starea stabilă. În Fig. 1 sunt prezentate elementele de circuit implicate în apariția ferorezonanței împreună cu factorii principali care determină evoluția în timp a fenomenului [1-7].

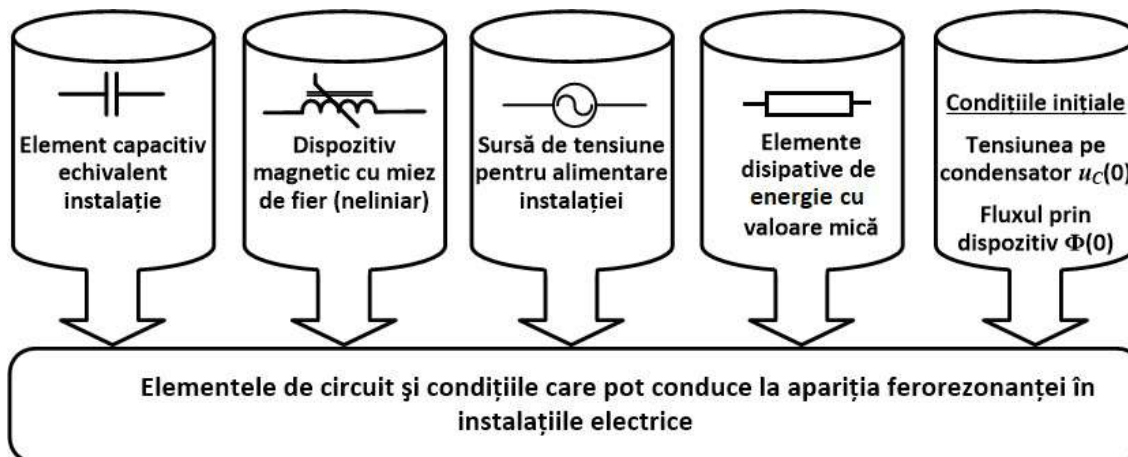


Fig. 1 Elementele de circuit implicate în ferorezonanță și factorii care influențează evoluția în timp a fenomenului.

Imediat după debutul ferorezonanței, punctul de funcționare al dispozitivului magnetic, care în condiții normale se află în regiunea liniară a caracteristicii sale magnetice (dependența flux-curent a acestuia) intră și părăsește periodic (la fiecare semiperioadă a sursei de energie) zona de saturație a miezului magnetic. În consecință, se stabilesc valori multiple (extrem de diferite) pentru inductivitatea dispozitivului. Acestea sunt foarte scăzute în zona de saturație a miezului feromagnetic, fapt ce determină creșteri importante (cu mult peste cele nominale) ale intensității curentului electric prin dispozitiv precum și a tensiunii la bornele sale. În plus, neliniaritatea dispozitivului magnetic generează și distorsiunea accentuată a formelor de undă ale acestor mărimi în regimurile staționare [1-7]. De asemenea, regiunea neliniară a dispozitivului feromagnetic creează și condițiile care pot determina o evoluție impredictibilă a circuitului ferorezonant. Astfel, o mică variație a parametrilor poate determina o modificare bruscă (schimbare) a stării circuitului [10-19]. Datorită variației continue a valorii inductivității dispozitivului magnetic pe durata fenomenului, se pot identifica mai multe *stări stabile* denumite *moduri* sau *tipuri* de ferorezonanță (*ferroresonance modes*). Acestea, spre deosebire de rezonanța liniară, nu au o frecvență proprie și sunt clasificate astfel [5, 9, 10]: două moduri periodice: *fundamental* și *subperiodic* (*fundamental* și *subharmonic*) și două moduri neperiodice: *cvasiperiodic* și *haotic* (*quasi-periodic* și *chaotic*).

Înainte de a detalia proprietățile fiecărui mod de ferorezonanță, prezentăm pe scurt metode de analiză frecvent utilizate în caracterizarea acestora, care provin din analiza sistemelor dinamice neliniare [1-7]. Mai precis din teoria bifurcației (*Bifurcation theory*), care, în esență, analizează evoluția unui sistem, determinată de modificarea valorii unor parametri de control [10-19].

- ❖ *Metoda analizei spectrale (spectral density)*, în care formele de undă ale tensiunilor și curenților sunt supuse unei analize de tip Fourier discrete (*FFT, Fast Fourier Transform*). Prezența a mai mult de o frecvență dominantă în spectrul acestora indică „multiplicitatea în periodicitate”, specifică pentru unele moduri de ferorezonanță (cea de tip periodic).
- ❖ *Reprezentarea în planul (spațiul) fazelor (phase-plane diagrams sau phase portraits)* a mărimilor ilustrează reprezentarea simultană a două variabile de stare ale sistemului (de regulă o mărime și derivata sa, spre exemplu tensiune și flux). Rezultatul este evoluția în timp a unui punct care urmează o traiectorie. Aceste traiectorii de fază pot fi curbe închise sau deschise. Cele închise, corespund unor regimuri periodice, iar cele deschise unora neperiodice.
- ❖ *Diagrama Poincaré (Poincaré map sau Poincaré section)* este o diagramă simplificată a traiectoriei de evoluție a unui sistem în spațiul fazelor. Aceasta ilustrează o secvență de puncte discrete obținute prin eșantionare din traiectoria în spațiul fazelor. Frecvența de eșantionare (sau de referință) este constantă și egală, de regulă, cu frecvența sistemului de alimentare. Diagrama Poincaré, permite discriminarea modurilor ferorezonanței (soluțiile periodice reduc diagrama Poincaré la un punct discret).

Un avantaj major al acestor mijloace de investigație îl constituie faptul că permit obținerea rapidă a unor informații calitative importante asupra comportării și proprietăților generale ale sistemelor analizate (circuitelor ferorezonante): influența condițiilor inițiale, posibilitatea apariției autooscilațiilor, stabilitatea și altele [10-19]. Acest lucru este posibil fără a fi necesară determinarea explicită a tuturor soluțiilor sistemelor de ecuații diferențiale care modelează regimurile dinamice neliniare și neautonome specifice ferorezonanței. În plus, aceste metode se pretează abordării numerice a sistemelor și pot fi implementate cu ușurință în programele de calcul actuale.

Principalele caracteristici ale modurilor de evoluție stabilă a ferorezonanței sunt următoarele [1-7, 10-19]:

- *Modul fundamental* se caracterizează prin forme de undă periodice ale tensiunii și curentului ce au un spectru de frecvență în care dominantă este componenta fundamentală (de frecvență f egală cu cea a sursei de energie) și care conține și armonici impare cu amplitudine descrescătoare odată cu ordinul acestora. Planul fazelor este reprezentat dintr-o curbă închisă, iar diagrama Poincaré se reduce la un punct îndepărtat față de cel asociat stării nominale (fără ferorezonanță).

În Fig. 2 este caracterizat un circuit ferorezonant aflat în modul *fundamental*.

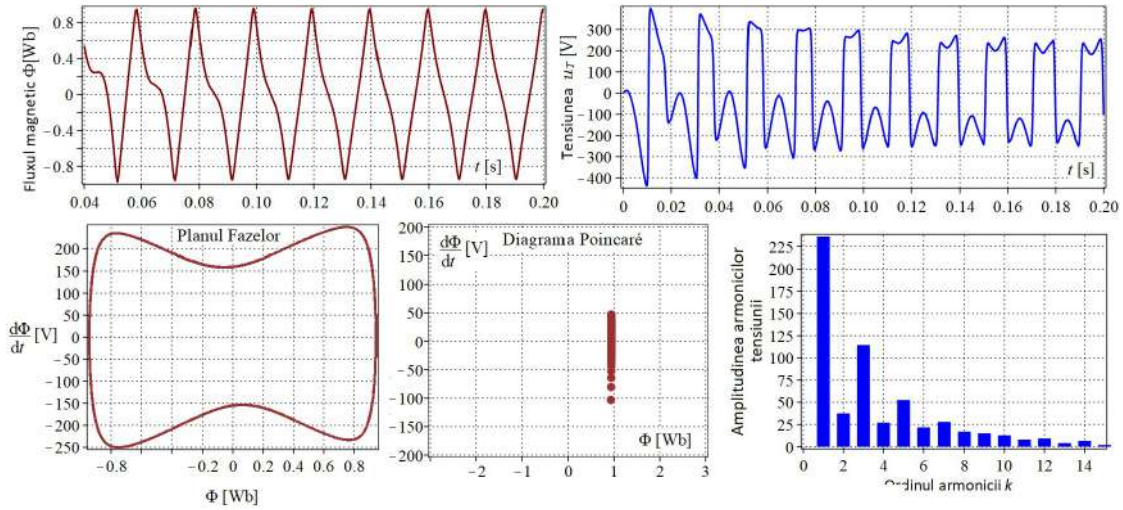


Fig. 2. Caracteristicile principale ale modului fundamental al ferorezonanței.

- Modul *subarmonic* păstrează periodicitatea formelor de undă ale curentului și tensiunii, dar frecvența acestora este f/n , în care n este un număr întreg. Aceste moduri de ferorezonanță sunt cunoscute ca subarmonice de ordin $1/n$. În consecință, spectrul armonic cuprinde componenta f/n (ca fundamentală) și armonicile sale. Spațiul fazelor prezintă o traiectorie închisă cu n margini, iar diagrama Poincaré ilustrează n puncte.

În Fig. 3 este caracterizat un circuit ferorezonant aflat în modul *subarmonic*.

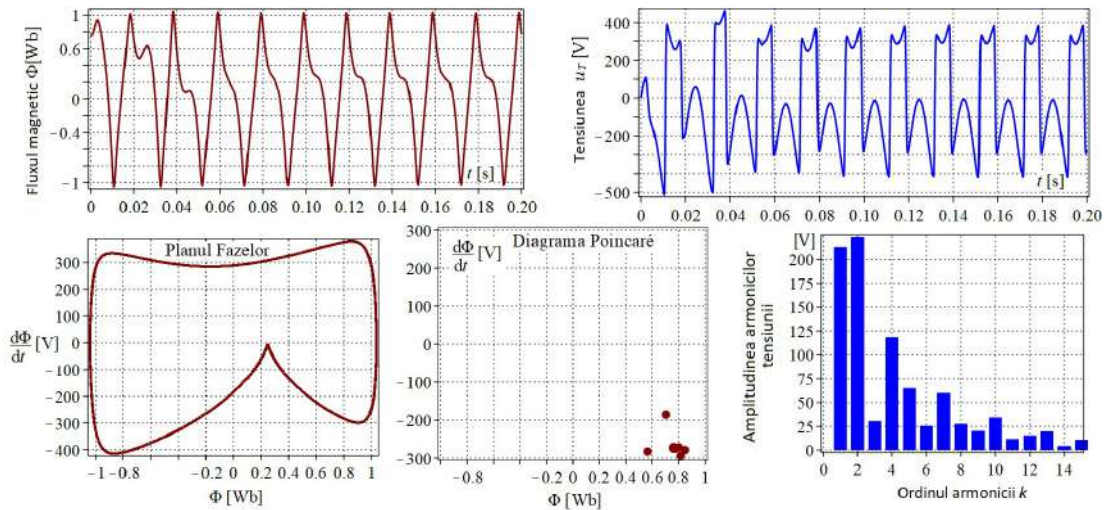


Fig. 3. Caracteristicile principale ale modului subarmonic al ferorezonanței.

- Modul *cvasiperiodic* prezintă, pentru formele de undă ale tensiunii și curentului, cadre neregulate de periodicitate cu frecvențe care pot fi exprimate cu relația: $nf_1 + mf_2$, în care f_1/f_2 este un număr irațional, iar m și n sunt numere întregi. Spectrul acestor forme de undă

este unul discontinuu. În planul fazelor sunt traiectorii în schimbare, iar diagrama Poincaré prezintă puncte discrete depărtate.

În Fig. 4 este caracterizat un circuit ferorezonant aflat în modul *cvasiperiodic*.

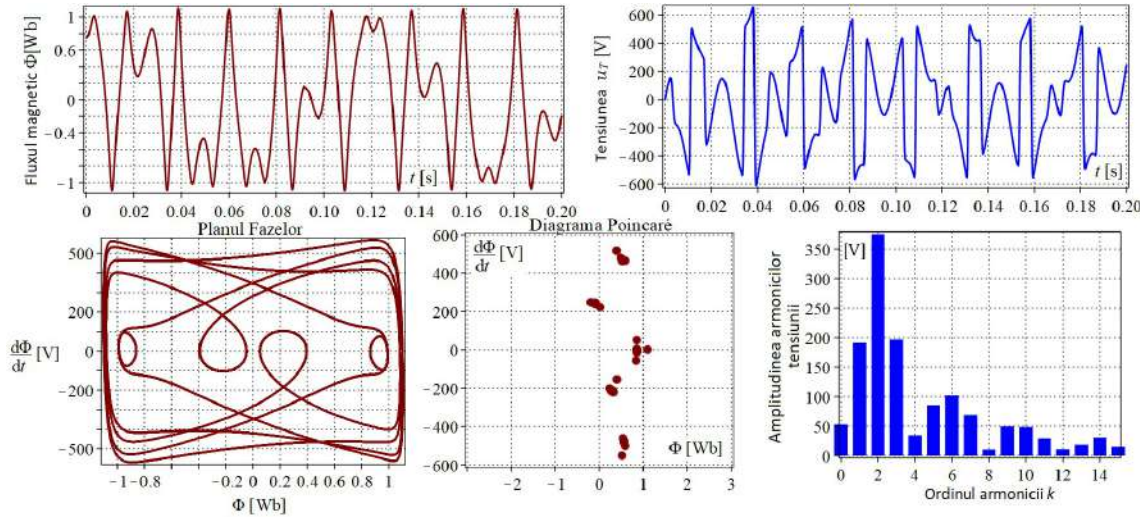


Fig. 4. Caracteristicile principale ale modului *cvasiperiodic* al ferorezonanței.

- *Modul haotic* este caracterizat de lipsa totală a periodicității formelor de undă ale curenților și tensiunii. Spectrul armonic al acestora este unul continuu. Spațiul fazelor este reprezentat de traiectorii care nu se închid niciodată, iar harta Poincaré arată o multitudine de puncte discrete fără a forma un model fix.

În Fig. 5 este caracterizat cantitativ un circuit ferorezonant aflat în modul *haotic*.

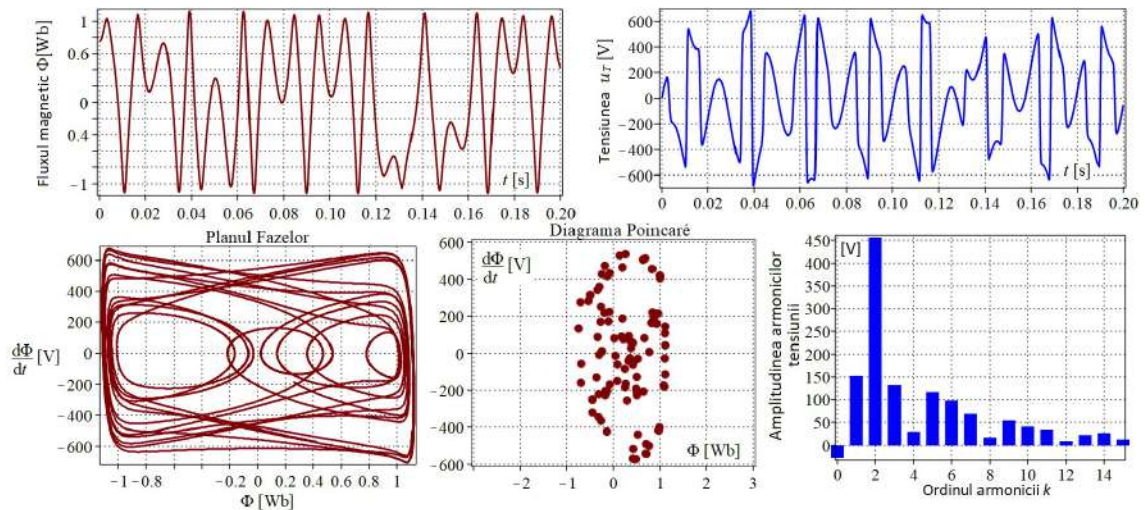


Fig. 5. Caracteristicile principale ale modului *haotic* al ferorezonanței.

Este important de subliniat faptul că toate modurile stabile de manifestare a ferorezonanței (chiar și cele haotice) sunt fenomene staționare, stabilite la mult timp după ce starea tranzitorie s-a încheiat. Cu toate acestea, datorită caracteristicilor specifice modului haotic, este destul de dificil să se realizeze distincția dintre acest regim staționar ferorezonant și unul tranzitoriu. În plus, ferorezonanța este foarte sensibilă la orice variație a sistemului (amplitudinea sau puterea de scurtcircuit a sursei de tensiune), modificări topologice (defecțiuni, comutații) și condiții inițiale (fluxuri magnetice reziduale, tensiune inițială a elementului capacitiv, momentul de comutație). Aparițiile oricăreia dintre aceste modificări ale sistemului pot determina salturi bruște (numite și bifurcații) între diferite moduri staționare de manifestare ale ferorezonanței. În consecință, analiza fenomenului de ferorezonanță reclamă necesitatea utilizării unor parametri (cantitativi) simpli, ușor de gestionat, care să poată indica comportamentul circuitului.

3. PROCEDURA PROPUȘĂ DE CALCUL A FEROREZONANȚEI

Metoda propusă a fost concepută pentru a fi aplicată studiului ferorezonanței dispozitivelor magnetice neliniare monofazate de joasă tensiune și cu o putere nominală de maxim 25 kVA. Procedura propusă are la bază descrierea adecvată a dependenței fluxului de curent pentru dispozitivul magnetic neliniar (cu ajutorul a diverse funcții analitice specifice – selectate în funcție de caracteristica materialelor magnetice) și rezolvarea numerică a sistemului de ecuații integro-diferențiale asociate procesul dinamic de inițiere a fenomenului de ferorezonanță. Se obțin astfel soluțiile în domeniul timp atât pentru regimul tranzitoriu, cât și pentru regimul staționar.

Multe dintre transformatoarele utilizate în instalațiile de joasă tensiune au o geometrie a miezului magnetic de forma U+I – Fig. 6. Modelul de circuit al acestor dispozitive magnetice și în care poate apărea ferorezonanța este ilustrat în Fig. 7. Transformatorul este reprezentat de o bobină neliniară cu inductivitate L_m variabilă, conectată în paralel cu rezistența R_m . Aceasta din urmă modelează pierderile în miezul magnetic (în fier), dar poate, de asemenea, reprezenta și o încărcare mică a transformatorului (în cazul în care conectarea la rețea a acestuia nu s-a făcut în gol). Rezistența R_p reprezintă suma dintre rezistența înfășurării primare a transformatorului și rezistența rețelei de alimentare.

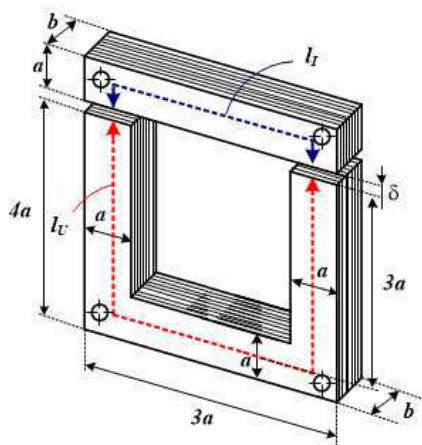


Fig. 6. Transformatorul cu forma geometrică U+I a miezului magnetic și

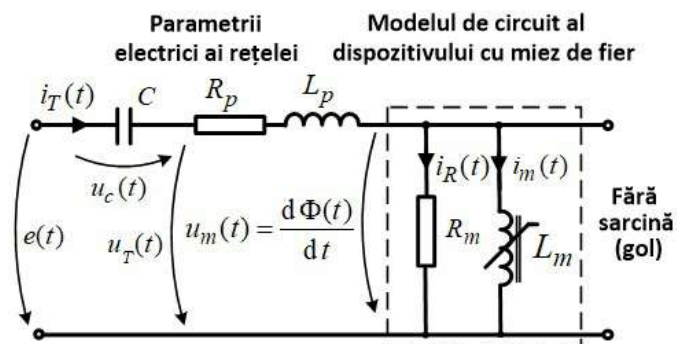


Fig. 7. Modelul de circuit cu care este analizată ferorezonanța transformatoarelor cu geometrie U+I a miezului magnetic.

dimensiunile lui geometrice.

În același mod, L_p modelează inductivitatea de dispersie însumată cu inductivitatea rețelei (efectele inductive ale cablurilor de alimentare). Condensatorul de capacitate C modelează, de asemenea, diverse elementele capacitive din instalație (aparate de comutație, echipamente de conectare, baterii de condensatoare ale sistemelor de compensare a puterii reactive etc.).

Prin urmare, evoluția în timp a circuitului, după conectarea acestuia la o sursă de energie (de tensiune), este descrisă de un sistem nelinier și neautonom de ecuații diferențiale. Acesta, exprimat cu ajutorul variabilelor de stare (curentul prin transformator, fluxul magnetic în miezul magnetic al acestuia și tensiunea pe condensator), capătă următoarea formă:

$$\begin{cases} E\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi) = u_c(t) + R_p i(t) + L_p \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\Phi(t)}{dt}, \\ i_m(t) = g[\Phi(t)], \quad i_T(t) = i_c(t) = \frac{1}{R_m} \frac{d\Phi(t)}{dt} + g[\Phi(t)], \\ e(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha), \quad u_T(t) = e(t) - u_c(t), \\ L_p C \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + C(R_p + R_m) \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = e(t) - R_m g[\Phi(t)], \end{cases} \quad (1)$$

în care: $i_T(t)$ reprezintă curentul prin transformator și prin sursa de energie cu tensiunea $e(t)$ (de valoare efectivă E , pulsație ω și faza inițială φ), $i_m(t)$ este curentul prin bobina neliniară de inductivitate variabilă L_m , iar $u_c(t)$ este tensiunea la bornele condensatorului.

Pentru a putea stabili caracteristica magnetică a dispozitivului (dependența $i-\Phi$) aplicăm teorema lui Ampère de-a lungul liniei mediane a circuitului magnetic format din cele două piese feromagnetice în formă geometrică de U și respectiv I, precum și legea fluxului magnetic pe suprafețe închise din proximitatea întrefierului și care să conțină cele două piese feromagnetice. Se obțin astfel următoarele expresii între mărimile magnetice ale dispozitivului:

$$\begin{aligned} H_U(t)l_U + H_I(t)l_I + H_0(t)2 \cdot \delta = N_1 i_m(t), \\ B_E(t) = \frac{\Phi(t)}{k_{st} N_1 A}, \quad B_I(t) = \frac{\Phi(t)(1-\sigma)}{k_{st} N_1 A}, \quad B_0(t) = \frac{\Phi(t)(1-\sigma)}{k_f N_1 A}, \end{aligned} \quad (2)$$

unde: A este aria secțiunii miezului magnetic, N_1 este numărul de spire al înfășurării primarului transformatorului, l_U , l_I sunt lungimile medii ale liniilor de câmp magnetic în piesele feromagnetice de geometrie U și I ale miezului, δ reprezintă lungimea întrefierului, iar μ_0 este permeabilitatea magnetică a vidului. În mod corespunzător, $H_U(t)$, $H_I(t)$, $H_0(t)$ și $B_U(t)$, $B_I(t)$, $B_0(t)$ sunt intensitățile câmpului magnetic, respectiv inducțiile câmpului magnetic în aceste zone. Factorii k_f , σ , și k_{st} modelează efectele de capete, pierderile de flux și, respectiv, utilizarea materialului magnetic activ din miez [18].

Noile materiale magnetice de eficiență energetică ridicată (cu pierderi reduse), utilizate în construcția transformatoarelor, au o caracteristică magnetică (dependența H - B) care poate fi descrisă, în mod aproximativ, cu ajutorul unor funcții polinomiale de ordin superior de tipul:

$$H(t) = f[B(t)] = \alpha B(t) + \beta B^9(t), \quad (3)$$

în care α și β care intervin în funcția de aproximare sunt determinați prin *metoda punctelor de coincidență*. Aceasta constă în alegerea pe caracteristica neliniară a unui număr de puncte egal cu cel al coeficienților necunoscuți. Introducând apoi în funcția de aproximare perechile de valori ale mărimilor de variație corespunzătoare, se obține un sistem compatibil determinat a cărui rezolvare conduce la stabilirea coeficienților funcției de aproximare.

Prin urmare, având în vedere funcția de aproximare selectată, intensitatea câmpului magnetic în cele trei regiuni ale transformatorului devine [47]:

$$\begin{cases} H_U(t) = \alpha \frac{1}{N_1 k_{st} A} \Phi(t) + \beta \frac{1}{(N_1 k_{st} A)^9} \Phi^9(t), \\ H_I(t) = \alpha \frac{(1-\sigma)}{N_1 k_{st} A} \Phi(t) + \beta \frac{(1-\sigma)^9}{(N_1 k_{st} A)^9} \Phi^9(t), \\ H_0(t) = \frac{(1-\sigma)}{\mu_0 N_1 k_f A} \Phi(t). \end{cases} \quad (4)$$

Considerând Fig. 6 și datele geometrice, se pot stabili cele două lungimi medii ale liniilor de câmp în piesele feromagnetice: $l_I = 3a$ și $l_U = 9a$. Dependența curent-flux a transformatorului poate fi acum estimată cu relația:

$$i_m(t) = g[\Phi(t)] = \frac{H_U(t)l_U + H_I(t)l_I + H_0(t)2 \cdot \delta}{N_1} = \gamma \Phi(t) + \xi \Phi^9(t), \quad (5)$$

unde parametrii γ și ξ depind exclusiv de datele constructive ale transformatorului. Dependența $i(t) = g[\Phi(t)]$ este utilizată ulterior de către procedura dezvoltată, care permite predeterminarea mărimilor electrice și magnetice din circuitul ferorezonant.

Aceste formulări ale sistemului de ecuații facilitează rezolvarea lor cu ajutorul diverselor proceduri numerice de calcul. Soluționarea acestor sisteme de ecuații reclamă cunoașterea condițiilor inițiale exprimate fie prin fluxul magnetic inițial și a derivatei acestuia, fie prin fluxul inițial împreună cu valoarea tensiunii pe condensator înainte de debutul comutației. Procedura de calcul le consideră pe cele mai defavorabile: fluxul magnetic și tensiunea pe condensator maximă, iar comutația are loc la trecerea prin zero a formei de undă a tensiunii.

Trebuie menționat că ecuațiile diferențiale sunt adaptate fiecărui dispozitiv magnetic investigat, considerând-se caracteristicile constructive ale acestuia, precum și datele sale

tehnologice. Pentru soluționarea numerică a acestor ecuații sunt adoptate procedurile de calcul numeric Runge – Kutta – Fehlberg (*RKF*) și Rosenbrock [20, 21].

În Fig. 8. este reprezentat în mod simplificat algoritmul de calcul al circuitelor ferorezonante monofazate de joasă tensiune. Așa cum se poate remarca, procedura solicită cunoașterea datelor nominale ale dispozitivului supus ferorezonanței și a caracteristicilor sale magnetice (descrierea materialului feromagnetic). De asemenea, metoda mai consideră ca date de intrare valorile parametrilor concentrați ai rețelei în care este alimentat dispozitivul feromagnetic (capacitate C , inductivitate L_p și rezistență R_p), precum și valoarea efectivă a tensiunii de alimentare și frecvența acesteia. Se permite astfel realizarea unui studiu aprofundat, în domeniul timp a fenomenului.

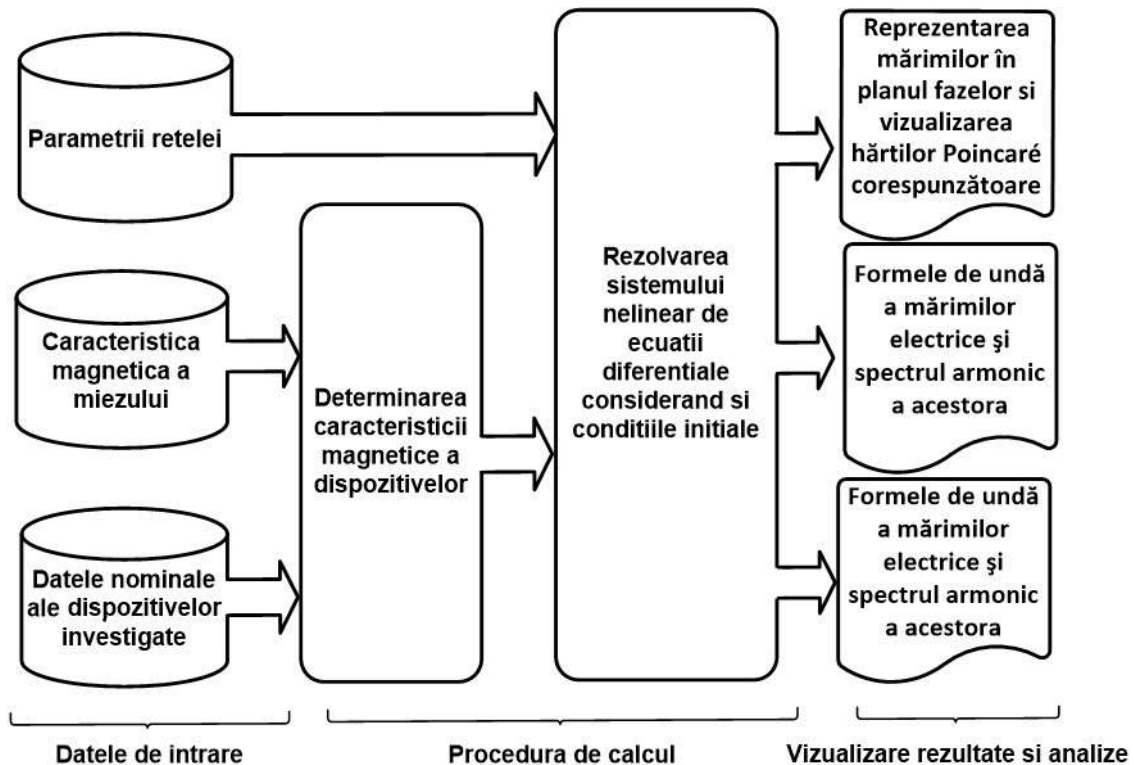


Fig. 8. Algoritmul de calcul al fenomenului de ferorezonanță pentru dispozitivele magnetice monofazate de joasă tensiune.

4. APLICAREA METODEI – STUDIU DE CAZ

Pentru a exemplifica performanțele de calcul ale procedurii propuse, a fost analizată interacțiunea dintre un transformator monofazat de putere nominală 5 kVA și o rețea alimentată la o tensiune de valoare efectivă $E = 230$ V și frecvența $f = 50$ Hz, care prezintă o capacitate echivalentă totală $C = 30$ μ F. Dimensiunile geometrice ale miezului magnetic al transformatorului sunt ilustrate în Fig. 6, iar valorile lor numerice împreună cu alte date tehnice semnificative sunt indicate în Tab. 1. Miezul magnetic al transformatorului este realizat din tole de FeSi cu inducție magnetică remanentă $B_r = 0,98$ T. Caracteristica de

magnetizare este prezentată în Fig. 9, unde se poate distinge atât seria limitată de perechi de puncte $H-B$ (indicată de producătorul materialului magnetic), cât și funcția polinomială adoptată în calcule (linia continuă). Se poate observa că aceasta din urmă acoperă toată zona de funcționare a miezului pe durata fenomenului de ferorezonanță. În Fig. 10 se prezintă caracteristica magnetică a dispozitivului ($\Phi-i$), care a luat în considerare valorile factorilor constructivi (estimați conform specificațiilor furnizate de producătorii transformatorului): factorul fluxului de pierderi $\sigma = 0.9\%$, factorul efectelor de capăt $k_f = 0,98$ și factorul de umplere al miezului magnetic $k_{st} = 0,97$. În aplicarea procedurii de calcul s-au adoptat cele mai defavorabile condiții inițiale la momentul stabilirii ferorezonanței: fluxul maxim în transformator, condensatorul încărcat la valoarea maximă a tensiunii rețelei, iar momentul comutației se realizează odată cu trecerea prin zero a tensiunii ($\varphi = 0$). Variabilele de stare ale circuitului sunt evaluate pe un interval de timp de 0,3 s (15 perioade ale sursei de alimentare). Astfel, Fig. 11 prezintă variația în timp a curentului prin transformator $i_T(t)$, a tensiunii la bornele sale $u_T(t)$, a fluxului magnetic $\Phi(t)$ și a tensiunii pe condensator $u_C(t)$.

Se poate observa că forma de undă a curentului prin transformator precum și a tensiunii la bornele acestuia au maxime care depășesc cu mult valorile nominale ale dispozitivului și, în plus, sunt puternic distorsionate. Supracurenții și supratensiunile generate de ferorezonanță pot determina solicitări termice și electrodinamice ireversibile în transformator care pot conduce la funcționarea deficitară a dispozitivului și în final la reducerea semnificativă a duratei lui de viață.

Tab. 1. Datele nominale ale transformatorului investigat, cu forma geometrică a miezului magnetic de tip U+I.

$S_n = 5 \text{ kVA}$	Puterea nominală
$U_{1n} = 0,23 \text{ kV}$	Tensiunea nominală în primar
$U_{2n} = 24 \text{ V}$	Tensiunea nominală în secundar
$f = 50 \text{ Hz}$	Frecvența nominală a transformatorului
$P_0 = 65 \text{ W}$	Pierderile în gol
$P_{sc} = 160 \text{ W}$	Pierderile de scurtcircuit
$i_0 = 1\%$	Curentul de mers în gol
$u_{sc} = 3.7\%$	Tensiunea de scurtcircuit
$N_1 = 160$	Numărul de spire primar
$R_1 = 0,169 \Omega$	Rezistența înfășurării primare

$L_p = 0,3127 \text{ mH}$	Inductivitatea de scăpări a înfășurării primare
$R_m = 813 \Omega$	Rezistența corespunzătoare pierderilor în Fe
$B_n = 1,01 \text{ T}$	Inducția magnetică nominală
$A_c = ab = 51,5 \text{ cm}^2$	Aria secțiunii miezului magnetic
$a = 50 \text{ mm}$	Dimensiunea de referință a miezului U+I
$b = 103 \text{ mm}$	Grosimea miezului
$\delta = 0,10 \text{ mm}$	Grosimea întrefierului

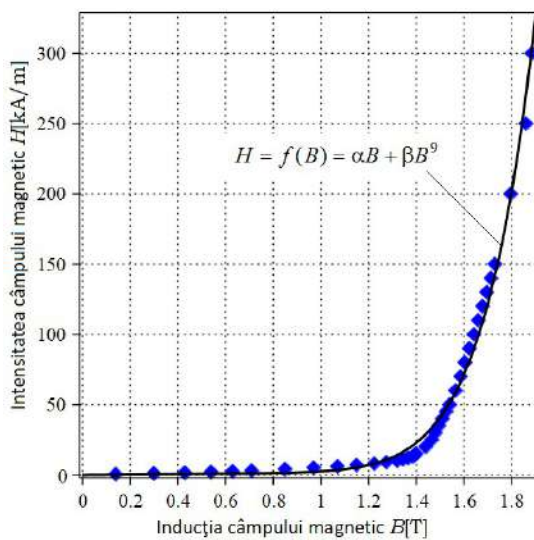


Fig. 9. Caracteristica magnetică a tolelor transformatorului (puncte discrete) și funcția de interpolare polinomială selectată (linie continuă).

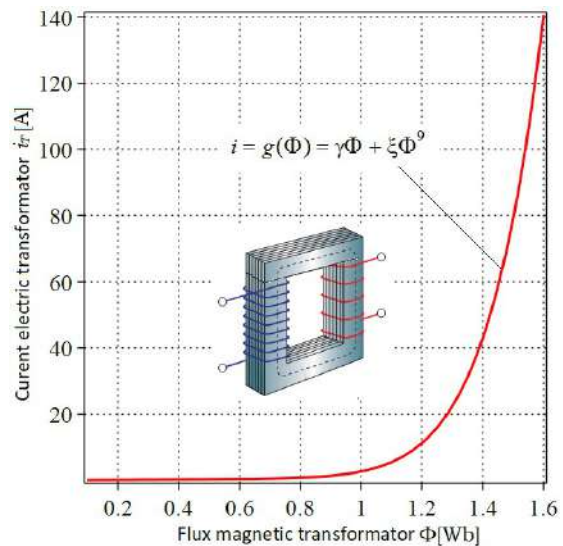


Fig. 10. Caracteristica magnetică a dispozitivului (transformatorului), utilă pentru aprecierea fenomenului de ferorezonanță.

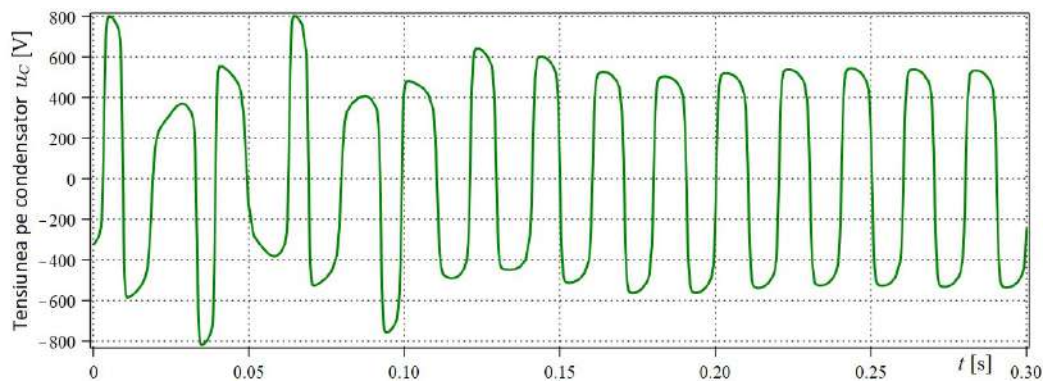
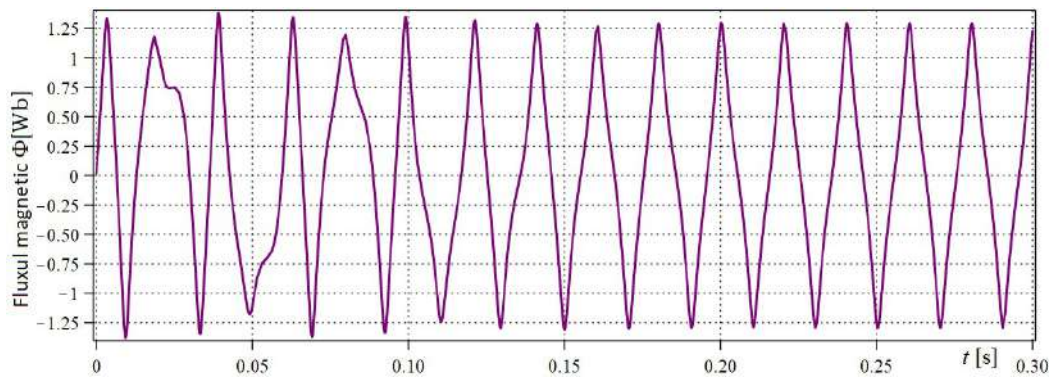
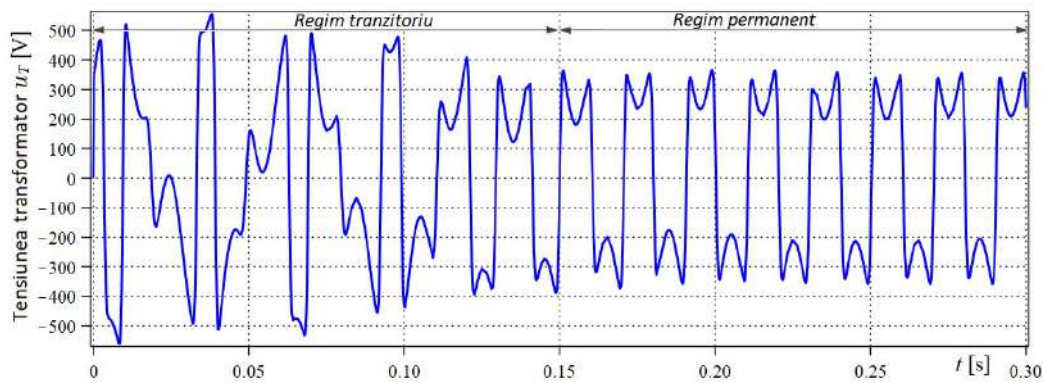
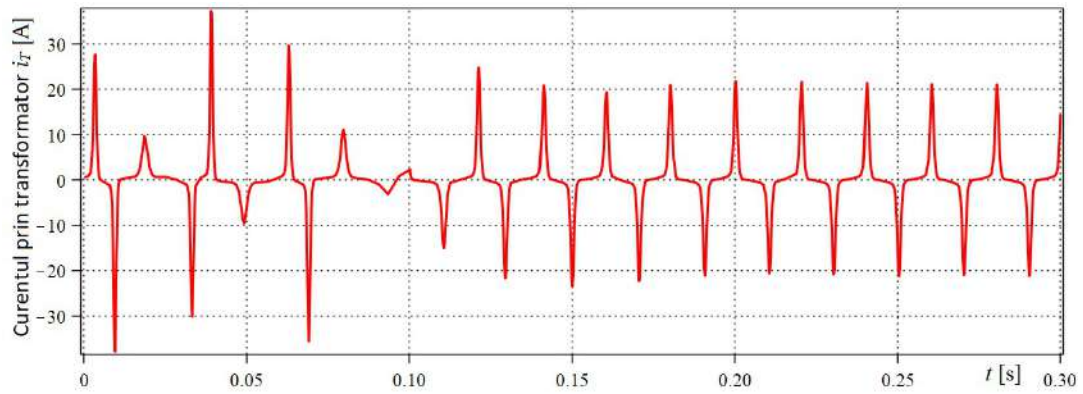


Fig. 11. Variațiile în timp a curentului prin transformator, a tensiunii la bornele sale, a fluxului său magnetic și a tensiunii la bornele condensatorului.

Analiza armonică pentru forma de undă a tensiunii la bornele transformatorului și a curentului prin acesta în regimul stabilizat (staționar) de ferorezonanță (efectuată până la armonica de ordin 20) indică prezența semnificativă a armonicilor de ordin impar în spectrul acestora - Fig. 12, și respectiv, Fig. 13. Această poluare armonică semnificativă poate cauza numeroase probleme de calitate a energiei electrice în instalație, care afectează și consumatorii alimentați dintr-un punct comun de conectare cu transformatorul.

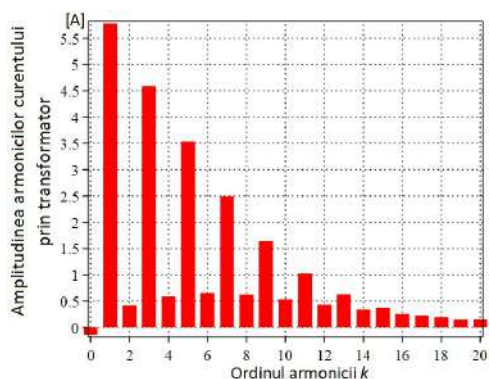


Fig. 12. Spectrul armonic al tensiunii la bornele transformatorului în regimul staționar al ferorezonanței.

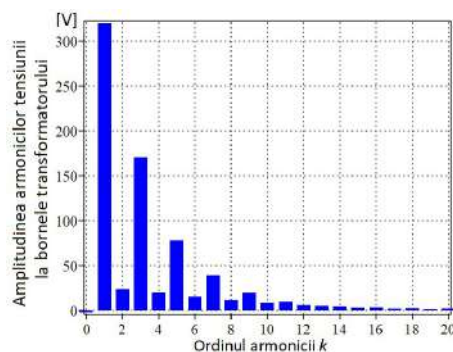


Fig. 13. Spectrul armonic al curentului prin transformator în regimul staționar al ferorezonanței.

Evoluția în timp a reprezentării în spațiul fazelor a fluxului magnetic în transformator (mărime de stare) pe durata ferorezonanței se stabilizează la o traiectorie închisă -Fig. 14. De asemenea, diagrama Poincaré, reprezentată pentru un interval de timp egal cu 500 de perioade ale sursei de alimentare, se reduce la un singur punct după atenuarea regimului tranzitoriu- Fig. 15. Aceste informații adiționale dezvăluie modul fundamental al ferorezonanței în care se află circuitul pentru parametrii considerați. Numeroase alte simulări, efectuate pe diferite dispozitive cu miez de fier și pentru diverși parametri de rețea, au arătat că în circuitele reale de joasă tensiune sunt posibile doar modurile periodice de ferorezonanță (fundamental și, mai rar, cel subarmonic). Acest lucru este determinat, în principal, de valorile relativ mici ale elementelor capacitive echivalente, precum și de valoarea redusă a tensiunii nominale de alimentare a circuitelor (care poate avea valoarea maximă 1kV).

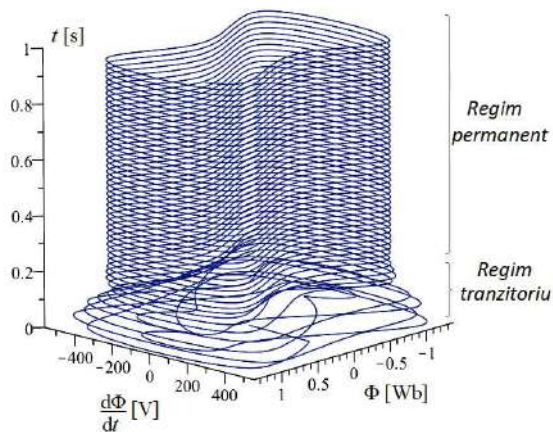


Fig. 14. Evoluția 3D în timp a reprezentării în spațiu fazelor pentru fluxul magnetic în transformator .

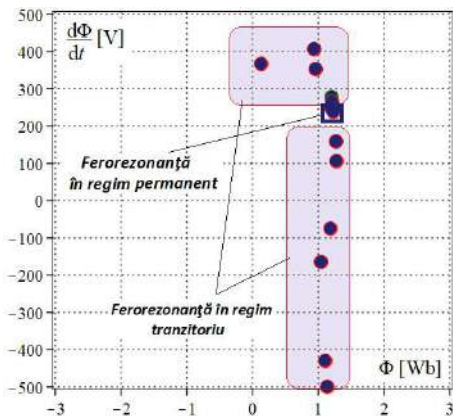


Fig. 15. Diagrama Poincaré pentru fluxul magnetic prin transformator.

4. CONCLUZII

În cadrul instalațiilor electrice moderne de joasă tensiune care utilizează echipamente de înaltă eficiență energetică ce includ dispozitive magnetice neliniare (transformatoare, bobine cu miez de fier etc.), conectate cu elemente capacitive, există posibilitatea apariției fenomenului de ferorezonanță. Incidența fenomenului de ferorezonanță în instalațiile de joasă tensiune clasice era una extrem de redusă datorită valorilor mici atât pentru tensiunea de alimentare, cât și pentru capacitatea echivalentă din instalație. Utilizarea extensivă a dispozitivelor magnetice neliniare cu randament ridicat a determinat în ultimele decenii favorizarea apariției acestui fenomen prin reducerea substanțială a valorii elementelor disipative ale energiei circulare. Din fericire, în instalațiile industriale de joasă tensiune au fost identificate exclusiv modurile periodice (fundamental și subarmonic) de manifestare a ferorezonanței. În plus, modul subarmonic reclamă prezența unor dispozitive magnetice puternic neliniare aflate în conexiune cu elemente capacitive de valoare ridicată a capacității. Altfel, transformatoarele cu miez magnetic masiv toroidal (fără tole), care nu au întrefier în circuitul lor magnetic, constituie unele din dispozitivele cele mai vulnerabile la apariția modului subarmonic de ferorezonanță.

Metoda dezvoltată în această lucrare are la bază soluționarea sistemului de ecuații diferențiale neliniare și neautonome, care modelează fenomenul de ferorezonanță, precum și aplicarea unor elemente de teoria bifurcației pentru vizualizarea rezultatelor. De asemenea, se aproximează caracteristica magnetică a miezului dispozitivelor cu diverse funcții analitice, menite să descrie cât mai precis zona lor de saturație. Procedura de calcul a fost aplicată în mod sistematic pentru diferite configurații de circuite ferorezonante, relevându-se calitățile sale de analiză, dar și flexibilitatea acestora. Datele transformatoarelor investigate pot fi accesate din bazele de date cu echipamente ale producătorilor, ce pot fi încorporate cu ușurință în procedura propusă. Acest lucru face ca metoda să fie foarte potrivită pentru investigațiile de teren, unde sunt necesare rezultate rapide și nu sunt disponibili mulți dintre parametrii dispozitivelor magnetice (transformatoarelor). Predeterminarea comportamentului circuitelor de ferorezonanță ar putea fi exploatată și prin identificarea unor metode de atenuare a consecințelor distructive ale fenomenului. Prin urmare, o selecție adecvată a unui dispozitiv cu miez de fier într-o anumită configurație alimentată de o sursă de energie se poate face

astfel încât să nu existe condițiile favorabile inițierii fenomenului de ferorezonanță. Majoritatea procedurilor de atenuare sugerează reducerea capacității echivalente a instalației prin utilizarea cablurilor cu lungimi mici și/sau evitarea instalării lor necorespunzătoare. În plus, menținerea transformatoarelor cu o sarcină, în timpul comutației, reduce considerabil probabilitatea apariției ferorezonanței. Pentru transformatoarele clasice (de randament obișnuit), datorită pierderilor nominale ale acestora (în înfășurări și miez), este suficientă o simplă rezistență pentru a elimina pericolul de apariție a ferorezonanței.

Analiza calitativă și cantitativă a rezultatelor obținute cu procedura dezvoltată în această lucrare ilustrează nivelul ridicat de solicitare (termică, electrodinamică și dielectrică) la care este supusă întreaga instalație pe parcursul manifestării fenomenului de ferorezonanță. Prin urmare, investigarea acestui fenomen devine o cerință foarte importantă pentru instalațiile actuale care includ numeroase dispozitive magnetice neliniare.

Metoda propusă pentru analiza ferorezonanței în instalații ar putea fi îmbunătățită cel puțin în următoarele direcții: *dezvoltarea unui model de histerezis* adecvat pentru caracterizarea mai precisă a materialului magnetic al miezului transformatorului care să utilizeze datele disponibile din instalație, *propunerea unor metode care să evite apariția condițiilor ce favorizează inițierea ferorezonanței și stabilirea unor noi indicatori de calitate a energiei electrice* care să exprime cantitativ vulnerabilitatea unei instalații sau circuit la fenomenul de ferorezonanță.

Confirmări

Lucrarea a fost sprijinită de “Programul Operațional Competitivitate - 2014 -2020”, “Acțiunea 1.2.1”, prin proiectul ID/Cod My SMIS 121611, număr de contract 273/24.06.2020 (acronim: SIPAMASRE).

BIBLIOGRAFIE

- [1] S. Mehta, P. Panwar, Ferroresonance: An Insight into the Phenomenon, International Journal of Advance Engineering and Research Development, vol. 4, no. 10, pp. 498-504, 2017.
- [2] E. Price, A tutorial on ferroresonance Proceeding on 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 676 - 704, 2014.
- [3] S. Hassan, M. Vaziri, S. Vadhva, Review of ferroresonance in power distribution grids, IEEE International Conference on Information Reuse & Integration, pp. 444-448, Las Vegas, NV, USA, 2011.
- [4] M. A. S. Masoum, E. Fuchs, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, 2nd Ed. Elsevier Academic Press, 2015, pp. 145.
- [5] P. Ferracci, Ferroresonance, Schneider Electric, Cahier technique no. 199, 2001.
- [6] J. Wiśniewski, E. Anderson, J. Karolak, Susceptibility of electrical network to ferroresonance occurrence, Computer Applications in Electrical Engineering, vol. 8, pp. 46—52, 2010.
- [7] V. Simha, W. Lee, The jump phenomena, IEEE Industry Appl. Mag., vol. 14, no. 5, pp. 53–59, Oct. 2008.
- [8] R. A. Walling, Ferroresonance in low-loss distribution transformers, IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 2, pp. 1220-1222, Toronto, Canada, 2003.

- [9] M. Hajizadeh, I. Safinejad, N. Amirshakari, Study and comparison of the effect of conventional, low losses and amorphous transformers on the ferroresonance occurrence in electric distribution networks, *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 865-869, 10 2017.
- [10] B. A. Mork and D. L. Stuehm, Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 2, pp. 1009–1017, Apr. 1994.
- [11] M. R. Iravani et al., Modeling and analysis guidelines for slow transients-Part III. The study of ferroresonance, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 1, pp. 255–265, 2000.
- [12] J. A. Corea-Araujo et al., Tools for characterization and assessment of ferroresonance using 3-D bifurcation diagrams, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2543-2551, December 2014.
- [13] F. Wörnle, D. K. Harrison, C. Zhou, Analysis of a ferroresonant circuit using bifurcation theory and continuation techniques, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 191- 196, January 2005.
- [14] M. Tajdinian, et al., Probabilistic framework for vulnerability analysis of coupling capacitor voltage transformer to ferroresonance phenomenon," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 344-351, 2020.
- [15] A. Tokić, J. Smajić, Modeling and Simulations of Ferroresonance by Using BDF/NDF Numerical Methods, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 30, no. 1, pp. 342-350, 2015.
- [16] D. A. N. Jacobson, P. W. Lehn, R. W. Menzies, Stability domain calculations of period-1 ferroresonance in a nonlinear resonant circuit, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 3, pp. 865–871, Jul. 2002.
- [17] P. S. Moses, M. A. S. Masoum, Experimental and simulation analysis of ferroresonance in single-phase transformers considering magnetic hysteresis effects, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-6, July 2010.
- [18] E. Cazacu, V. Ioniță, L. Petrescu, An efficient method for investigating the ferroresonance of single-phase iron core devices, *10th IEEE Int. Symp. on Advanced Topics in Elect. Eng. (ATEE 2017)*, Bucharest, pp. 363-368, 2017.
- [19] E. Cazacu, L. Petrescu, V. Ioniță, Ferroresonance modes determination of single-phase toroidal transformers, *15th IEEE International Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA2017)*, Sofia, pp. 358-361, 2017.
- [20] E. Hairer, C. Lubich, M Roche, *The Numerical Solution of Differential Algebraic Systems by Runge-Kutta Methods*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989
- [21] C. Schneider, Rosenbrock-Type Methods Adapted to Differential-Algebraic Systems, *Mathematics of Computation*, vol. 56, no. 193, pp. 201-213, 1991.