

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris

C.Z.U.: 621.316.1:004.9(043)

DOBREA INA

**ÎMBUNĂTĂȚIREA REGIMULUI DE FUNCȚIONARE A
REȚELELOR ELECTRICE DE DISTRIBUȚIE 6-35 kV PRIN
ALEGEREA MODULUI DE TRATARE A NEUTRULUI**

221.01 „Sisteme si Tehnologii Energetice”

Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești

CHIȘINĂU, 2023

**Teza a fost elaborată la Departamentul Energetică,
Universitatea Tehnică a Moldovei**

Conducător științific:

STRATAN Ion, dr. șt. teh., prof. univ., U.T.M.

Referenți oficiali:

ERHAN Tudor, dr. hab. șt. teh., Centrul de Excelență în Electroenergetică și Electronică

CHORSAC Mihail, dr. hab. șt. teh., prof. univ., U.T.M.

Componența Consiliului Științific Specializat:

ARION Valentin, dr. hab. șt. teh., prof. univ., U.T.M., *președinte*.

GUȚU-CHETRUȘCA Corina, dr. șt. teh., lect. univ., U.T.M., *secretar*.

AMBROS Tudor, dr. hab. șt. teh., prof. univ., U.T.M.

GROPA Victor, dr. șt. teh., conf. univ., U.T.M.

HLUSOV Viorica, dr. șt. teh., conf. univ., U.T.M.

CHELMENCIUC Corina, dr. șt. teh., conf. univ., Termoelectrica S.A.

Susținerea va avea loc la (28 decembrie 2023, ora 12.00) în ședința Consiliului Științific Specializat (D 221.01-23-96) din cadrul Universității Tehnice a Moldovei: Str. 31 August 1989, nr. 78, blocul de studii nr. 2, sala 2-222.

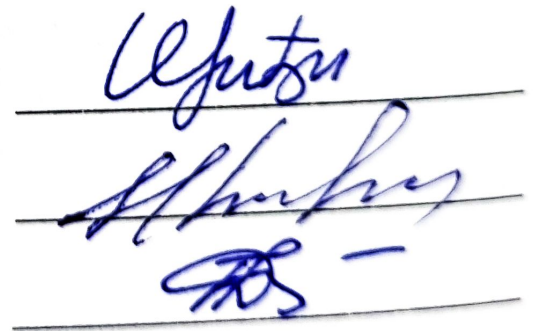
Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a ANACEC (<https://www.anacec.md>).

Rezumatul a fost expediat la ____ noiembrie 2023.

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,
GUȚU-CHETRUȘCA Corina, dr. șt. teh.

Conducător științific,
STRATAN Ion, dr. șt. teh., prof. univ.

Autor
DOBREA Ina



© DOBREA Ina, 2023

**Teza a fost elaborată la Departamentul Energetică,
Universitatea Tehnică a Moldovei**

Conducător științific:

STRATAN Ion, dr. șt. teh., prof. univ., U.T.M.

Referenți oficiali:

ERHAN Tudor, dr. hab. șt. tehn., Centrul de Excelență în Electroenergetică și Electronică

CHIORSAC Mihail, dr. hab. șt. tehn., prof. univ., U.T.M.

Componența Consiliului Științific Specializat:

ARION Valentin, dr. hab. șt. tehn., prof. univ., U.T.M., *președinte*.

GUȚU-CHETRUȘCA Corina, dr. șt. tehn., lect. univ., U.T.M., *secretar*.

AMBROS Tudor, dr. hab. șt. tehn., prof. univ., U.T.M.

GROPA Victor, dr. șt. tehn., conf. univ., U.T.M.

HLUSOV Viorica, dr. șt. tehn., conf. univ., U.T.M.

CHELMENCIUC Corina, dr. șt. tehn., conf. univ., Termoelectrica S.A.

Susținerea va avea loc la (28 decembrie 2023, ora 12.00) în ședința Consiliului Științific Specializat (D 221.01-23-96) din cadrul Universității Tehnice a Moldovei: Str. 31 August 1989, nr. 78, blocul de studii nr. 2, sala 2-222.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a ANACEC (<https://www.anacec.md>).

Rezumatul a fost expediat la 25 noiembrie 2023.

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,

GUȚU-CHETRUȘCA Corina, dr. șt. teh.

Conducător științific,

STRATAN Ion, dr. șt. teh., prof. univ.

Autor

DOBREA Ina

© DOBREA Ina, 2023

CUPRINS

1. REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
2. CONȚINUTUL TEZEI.....	8
2.1. Capitolul 1. Analiza modalităților de tratare a neutrului în rețelele electrice de distribuție 6-35 kV.....	8
2.2. Capitolul 2. Metode de creare a neutrului artificial.....	10
2.3. Capitolul 3. Solicitarea rețelelor electrice în funcție de modul de tratare a neutrului	12
2.4. Capitolul 4. Alegerea modului eficient de tratare a neutrului în rețele de distribuție. Studii de caz	19
CONCLUZII GENERALE	23
RECOMANDĂRI.....	24
BIBLIOGRAFIE (selectivă).....	25
LISTA PUBLICAȚIILOR ȘTIINȚIFICE LA TEMA TEZEI	26
ADNOTARE	29
ANNOTATION	30
АННОТАЦИЯ	31

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea și importanța temei abordate. Energia electrică a devenit un element vital pentru progresul economic al oricărei țări. Ea constituie un factor crucial în dezvoltarea industriei, infrastructurilor și serviciilor, având, în final, un aport semnificativ în sporirea productivității muncii și îmbunătățirea calității vieții. Importanța energiei electrice în evoluția și formarea civilizației actuale este cu adevărat inestimabilă.

Asigurarea cererii de energie electrică la nivel național este sarcina de bază a Sistemului Electroenergetic Național (SEN), acesta fiind divizat în segmente specializate – producerea, transportul, distribuția și furnizarea energiei electrice. Rețelele electrice de distribuție (RED) 6-35 kV și tehnologiile aferente acestora reprezintă unul dintre cele mai dinamice domenii de dezvoltare în sectorul electroenergetic. La începutul secolului XXI, îmbunătățirea continuă ale echipamentelor, tehnologiilor și materialelor au permis schimbarea abordărilor în construcția rețelelor de distribuție, revizuirea principiilor de organizare a sistemelor de alimentare a consumatorilor și necesitatea implementării unor soluții inovatoare în dezvoltarea și gestionarea acestora [1].

Principalele tendințe în dezvoltarea RED, care vor influența evoluția lor pe termen lung, sunt următoarele:

- Creșterea cererii de energie electrică și asigurarea majorării capacității de transport ale RED existente.
- Creșterea eficienței energetice ale rețelelor de distribuție (inclusiv reducerea pierderilor tehnice și nontehnice), îmbunătățirea gestionării și securității electrice.
- Implementarea tehnologiilor inovatoare, cum ar fi rețelele inteligente și metode avansate de stocare a energiei.
- Racordarea la rețeaua electrică de distribuție a surselor de energie regenerabilă și generarea distribuită.

Din măsurile tehnice, utilizate în rețelele de distribuție, modul de tratare a neutrilor acestora are o importanță practică deosebită care se repercutează, direct sau indirect, asupra: continuității și fiabilității în alimentarea consumatorilor cu energie electrică; comportării rețelelor electrice de medie tensiune (MT) în regim de defect monofazat și impactul acestuia asupra calității serviciului de distribuție a energiei electrice (durata și frecvența întreruperilor alimentării cu energie electrică); instalațiilor electrice și exploatarea acestora; soluțiilor tehnice adoptate; nivelului de asigurare a securității electrice, etc. Rețelele de distribuție au un rol important în asigurarea continuității alimentării cu energie electrică, în creșterea eficienței energetice, asigurarea securității personalului din stațiile electrice și consumatorilor de energie electrică, dar și în asigurarea unui preț adecvat al energiei electrice la utilizatorii finali.

Alegerea modului de tratare a neutrului în rețelele electrice de medie tensiune (6 - 35) kV este o problemă complexă datorită multitudinii de parametri ce trebuie de luat în considerare. În prezent în practica mondială nu există o soluție unitară a acestei probleme.

Studiile și cercetările efectuate în ultimii 15...20 de ani [2-5] confirmă că obținerea unui criteriu tehnic sau tehnico-economic determinat pentru alegerea soluției eficiente de tratare a neutrului în rețelele electrice MT este dificilă. În acest fel, alegerea modului eficient de tratare a neutrului trebuie realizat în raport cu o rețea electrică concretă, în condițiile unei țări concrete.

Descrierea situației în domeniul de cercetare și identificarea problemelor de cercetare.

Începând cu data de 1 ianuarie 2003, în Republica Moldova a fost implementată cea mai recentă (a 7-a) redacție a Normelor de Amenajare a Instalațiilor Electrice (NAIE) [6], care prevede posibilitatea funcționării rețelelor electrice cu tensiunea 3-35 kV atât cu neutrul izolat, cât și cu neutrul legat la pământ prin intermediul unei bobine de stingere sau a unui rezistor (p. 1.2.16).

În prezent, în cadrul RED-urilor din Republica Moldova se practică două moduri de tratare a neutrului, reglementate de NAIE [6], implementate de-a lungul timpului, după cum urmează:

1. neutrul izolat;
2. neutrul tratat prin bobină de stingere a arcului electric BSA, aceasta fiind cu reglaj manual sau automat.

Aceste moduri de tratare sunt aplicabile unor anumite configurații și tipuri de rețea și prezintă avantaje și dezavantaje, ceea ce impune perfecționarea lor continuă. Majoritatea rețelelor de distribuție la tensiunile menționate funcționează în regim de compensare a curentului capacitiv prin bobină de stingere. Mai există un număr redus de stații electrice în care neutrul este izolat, dar numai acolo, unde rețelele de distribuție nu sunt extinse, realizate, în fond, cu linii aeriene, ceea ce determină valori mici (sub 10 A) ale curenților capacitivi în rețea.

Din cauza dificultăților în promovarea investițiilor în rețelele 6 - 35 kV din țară, în prezent se pune accentul pe îmbunătățirea modului de tratare a neutrului prin identificare și implementare a noilor modalități de tratare a neutrului cu utilizarea unor rezistoare speciale de neutru. Cercetări în această direcție practic nu s-au efectuat, ceea ce permite de a constata existența unui potențial mare de îmbunătățire a funcționării rețelelor electrice de distribuție 6 - 35 kV.

Totodată, efectuarea unor încercări privind determinarea curentului de punere la pământ este practic exclusă, deoarece uzura avansată a echipamentelor din cadrul rețelelor electrice va determina situații de avarie cu consecințe grave. În acest caz se impune modelarea matematică a regimurilor analizate și simularea acestora în programe specializate.

Scopul cercetării: analiza potențialului de implementare a tratării neutrului numai prin rezistor sau combinat (BSA și rezistor) în rețelele electrice de distribuție din Republica Moldova și identificarea unui set de măsuri/acțiuni în vederea îmbunătățirii modurilor existente de tratare, precum și realizarea unor studii de caz prin modelarea regimurilor de funcționare ale rețelelor

electrice cu diferite moduri de tratare a neutrului.

Obiectivele cercetării:

- realizarea unui studiu bibliografic privind situația actuală a problemei pe plan mondial și în Republica Moldova;
- analiza comparativă a diferitelor moduri de tratare a neutrului;
- analiza regimului de defect monofazat în rețelele electrice de distribuție 6-35 kV și identificarea criteriilor de bază privind alegerea soluției eficiente de tratare a neutrului;
- modelarea regimului de defect monofazat pentru diferite moduri de tratare a neutrului;
- aplicarea rezultatelor obținute pentru elaborarea setului de măsuri/recomandări aplicabile în condițiile Republicii Moldova.

Ipoteza de cercetare: îmbunătățirea modurilor existente de tratare a neutrului rețelelor de distribuție din Republica Moldova sau implementarea soluțiilor noi va contribui la reducerea supratensiunilor în cazul defectelor monofazate, excluderea evoluției defectelor monofazate în scurtcircuite polifazate, creșterea fiabilității în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor finali, reducerea numărului de deconectări și creșterea indicatorilor de performanță a serviciului de distribuție.

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare alese

La realizarea obiectivelor propuse în lucrare s-au utilizat diverse instrumente matematice cum ar fi: modelarea matematică a regimurilor de funcționare ale rețelelor electrice în regim staționar și tranzitoriu provocat de punerea la pământ a unei faze (legare metalică la pământ și prin arc electric); calcule analitice; simulări în mediul de programare MatLab Simulink; încercări experimentale cu utilizarea standului de laborator „Analiza metodelor de tratare a neutrului în rețelele 6 – 35 kV”, elaborat în cadrul cercetărilor realizate în teza de doctorat.

Justificarea metodelor de cercetare este determinată de complexitatea fenomenelor care au loc în cazul defectelor monofazate, metalice sau prin arc electric. Regimurile tranzitorii provocate de acestea pot conduce la valori mult mai mari ale tensiunilor și curenților decât în regim stabilizat. Realizarea unor experimente și măsurări în rețelele electrice cu grad avansat de uzură poate provoca regimuri de avarie cu consecințe grave.

Noutatea științifică. Pentru prima dată este abordată problema regimului tratării neutrului rețelelor 6-35 kV în Republica Moldova și justificată implementarea noilor metode de tratare a neutrului. Sunt elaborate modelele matematice de calcul a parametrilor de regim pentru diferite modalități de tratare a neutrului rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV, ceea ce permite modelarea și simularea acestor regimuri, identificarea celui rațional, evitând încercările experimentale, limitate de uzura avansată a echipamentelor din cadrul rețelelor electrice.

Semnificația teoretică. În cadrul tezei a fost elaborate modelele matematice ale regimurilor de defect monofazat metalic și prin arc electric pentru diferite modalități de tratare a

neutrului rețelelor electrice 6-35 kV. Au fost identificați factorii principali de influență la alegerea regimului de tratare a neutrului rețelelor de distribuție în RM.

Semnificația practică. În lucrare au fost elaborate modelele matematice a patru regimuri de tratare a neutrului, au fost obținute expresiile analitice ale parametrilor de regim. Regimurile analizate au fost modelate și simulate, ceea ce a demonstrat corectitudinea modelelor obținute. Modelele elaborate pot fi dezvoltate în continuare pentru rețele electrice concrete.

Implementarea rezultatelor științifice și valoarea aplicativă a lucrării

Rezultatele cercetărilor au fost implementate la stațiile electrice „Centrala” 110/10 kV, „Bălți-330 kV” 330/110/10 kV și „CET-Nord” 110/10 kV ale întreprinderii S.A. RED-NORD: programul de calcul al curenților capacitivi de punere la pământ pentru orice configurație a rețelei; recomandările privind modurile eficiente de tratare a neutrului în rețelele RED-NORD și echipamentele corespunzătoare.

La Departamentul Energetica a UTM a fost elaborat un stand modern de laborator „Analiza metodelor de tratare a neutrului în rețelele 6 – 35 kV”. Standul permite modelarea regimurilor de tratare a neutrului (izolat, compensat) atât în cazul defectelor monofazate metalice cât și prin arc electric.

Rezultatele obținute sunt utilizate în procesul didactic, în cadrul disciplinelor Transportul și Distribuția Energiei Electrice și Partea Electrică a Centralelor și Stațiilor.

Aprobarea rezultatelor obținute

Rezultatele elaborărilor din cadrul tezei de doctor au fost publicate, prezentate și discutate în cadrul unor seminare, simpozioane și conferințe de nivel național și internațional: Conferințe Tehnico-Științifice a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM (anii 2005, 2006, 2008, 2011, 2014, 2016); Conferințe Internaționale SIELMEN (anii 2007, 2013, 2017, 2019, 2023), International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iași, 2022; II Международная научная конференция, Минск, 2022 г.; International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, 2023; culegeri naționale Securitatea energetică și linii electrice dirijate. Institutul de Energetică, 2022; reviste: Annals of the University of Craiova (anii 2019, 2020) și Journal Of Engineering Science UTM, 2023.

Publicații la tema tezei. Rezultatele cercetărilor științifice obținute au fost publicate în 22 lucrări, inclusiv 8 lucrări fără coautori, 4 lucrări metodico-didactice.

Structura și volumul tezei: Lucrarea conține introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 108 titluri și include 4 anexe, 181 pagini, 122 figuri, 12 tabele.

Cuvinte cheie: sistem electroenergetic, rețele electrice de distribuție, mod de tratare a neutrului, defect monofazat, supratensiuni, deplasarea neutrului, modelare matematică.

2. CONȚINUTUL TEZEI

În introducerea lucrării sunt prezentate tendințele actuale în domeniul îmbunătățirii eficienței rețelelor de distribuție 6-35 kV, este argumentată actualitatea, importanța și necesitatea cercetărilor efectuate, scopul și obiectivele tezei, problema științifică soluționată, importanța teoretică și practică a lucrării.

Capitolul 1 „**Analiza modalităților de tratare a neutrului în rețelele electrice de distribuție 6-35 kV**” reprezintă o sinteză a stadiului actual privind tendințele de abordare, dezvoltare, implementare și exploatare a diferitelor modalități de tratare a neutrului rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV pe plan mondial.

Clasificatorul țărilor străine în conformitate cu standardul [7], prevede cinci moduri de tratare a neutrului. Adică în practica mondială în rețele de medie tensiune (1 – 69 kV), spre deosebire de rețelele de înaltă tensiune (110 kV și mai mult), se constată următoarele modalități privind tratarea neutrului [8-13]:

1. *Neutrul izolat*. Este pe larg aplicat în statele postsovietice Rusia, Bielorusia, Ucraina, precum și în Italia, Spania, China și în unele zone din Germania, România, Finlanda (rețelele aeriene 20 kV). Dezavantajele esențiale ale acestui mod de tratare a neutrului au determinat excluderea aplicării acestuia încă în anii 40-50 a secolului XX în majoritatea țărilor din Europa, Australia, America de Nord și de Sud.
2. *Neutrul compensat (legat la pământ prin bobină de stingere)*, procedeu aplicat în majoritatea țărilor din Europa, China și în Rusia.
3. *Neutrul legat la pământ prin rezistență de mică sau mare valoare*. Această soluție se regăsește în Franța, în unele zone din Germania, Bulgaria, Ungaria, Rusia. În ultimii ani acest mod de tratare este implementat și în România, Bielorusia, Ucraina.
4. *Neutrul combinat sau soluție mixtă* (combinarea variantelor 2 și 3). Această soluție se aplică în Germania, Cehia, Rusia.
5. *Neutrul legat direct la pământ*. Modalitatea de tratare a neutrului aplicată în rețelele din Marea Britanie și în rețelele din SUA, Canada (Soluția anglo-saxonă).

Pentru fiecare metodă de tratare a neutrului rețelelor electrice de distribuție sunt analizate diferite aspecte teoretice în legătură cu tematica lucrării, sunt prezentate principalele caracteristici ale modurilor de tratare a neutrului rețelelor de MT, avantajele și dezavantajele.

În conformitate cu literatura de specialitate [14, 15], se enumeră cerințele tehnice ce trebuie îndeplinite pentru a asigura o gestionare optimă a rețelelor electrice de medie tensiune, respectiv, pentru alegerea unei soluții corespunzătoare de tratare a neutrului acestor rețele:

- calitatea alimentării consumatorilor și asigurarea continuității alimentării acestora;
- gradul de rezervare în alimentarea consumatorilor;
- caracteristicile rețelei și echipamentelor:
 - natura rețelei în cauză (rețea aeriană, în cablu sau mixtă);
 - structura rețelei (lungime, posibilități de buclare);
 - gradul de îmbătrânire a izolației;
 - valoarea admisibilă a curenților de defect;
- valorile supratensiunilor și a curenților de defect monofazat;
- posibilitatea realizării unor sisteme de protecție selective și rapide sau a unor automatizări corespunzătoare;
 - tehnologiile utilizabile pentru detectarea și separarea defectelor;
 - posibilitatea realizării unor protecții eficiente împotriva accidentării de persoane și de animale, precum și a unor protecții împotriva extinderii avariilor;
 - reglementările și normele privind securitatea persoanelor și animalelor;
 - valorile rezistențelor parcului de prize de pământ;
 - economicitatea soluției și necesitatea realizării unor tipuri de echipamente noi.

Important de menționat că aceste cerințe nu pot fi îndeplinite în ansamblu, fiind dependente de tensiunea, structura și caracteristicile rețelei, etc. Este necesar un echilibru adecvat între aceste cerințe pentru a asigura continuitatea și fiabilitatea necesară în alimentarea consumatorilor cu energie electrică, pentru realizarea protecțiilor respective și a instalațiilor de legare la pământ, pentru a garanta securitatea electrică a persoanelor și animalelor, precum și pentru reducerea numărului deconectărilor și a costurilor aferente acestora.

Alegerea unei soluții de tratare a neutrului rețelelor MT are o importanță semnificativă privind fiabilitatea de funcționare a rețelelor și determină principalii parametri ai rețelei: logica și schemele de protecție prin rele împotriva defectelor monofazate, nivelul supratensiunilor, care rezultă din punerile simple la pământ, valoarea curentului de punere la pământ, precum și nivelul de siguranță electrică a personalului și continuitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor.

Orice soluție de tratare adoptată presupune un efort de investiții considerabil și necesită fundamentare multilaterală a deciziei luate pentru o perioadă lungă de timp.

Pe plan mondial, problema alegerii modului eficient de tratare a neutrului rețelelor de medie tensiune este rezolvată în mod diferit. Acest fapt, în sine, demonstrează că niciuna dintre modalitățile cunoscute de tratare a neutrului nu are un avantaj absolut în raport cu celelalte. Fiecare

dintre ele poate fi caracterizată printr-un șir de avantaje și dezavantaje și este necesar de decis care din ele sunt prioritare pentru rețeaua electrică concretă examinată.

Alt aspect important analizat - generarea distribuită (GD) în rețelele electrice cu conectarea surselor de energie regenerabilă (SER) ce reprezintă o tendință actuală pentru rezolvarea problemelor de mediu, precum și a celor de deficit de energie [16-19]. Pe lângă beneficiile incontestabile ale GD, integrarea surselor regenerabile în sistemul electroenergetic are un impact asupra rețelelor electrice și creează noi provocări pentru specialiștii din domeniu. Alegerea modului rațional de tratare a neutrului poate soluționa, direct sau indirect, problema protecțiilor și structurii acestora, deoarece caracterul defectelor monofazate nemijlocit depinde de modul tratării neutrului.

Reieșind din studiul realizat în primul capitol au fost formulate concluzii, fiind accentuate importanța, actualitatea și necesitatea revizuirii modalităților existente de tratare a neutrului rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV și implementării, în mod prioritar, a tratării neutrului cu rezistor de neutru sau combinat.

Capitolul 2 „**Metode de creare a neutrului artificial**” abordează aspecte practice ce țin de accesul la neutrul rețelelor electrice de medie tensiune. Tratarea neutrului, fie prin BSA sau rezistor, presupune racordarea acestora la neutrul rețelei. Transformatoarele de putere trifazate folosite în rețelele electrice de distribuție 6-35 kV, au schema de conexiune a înfășurării secundare în triunghi, deci neutrul rețelei electrice este inaccesibil (fizic lipsește). De aceea apare necesitatea de creare a neutrului artificial folosind în acest scop transformatoare speciale.

În acest caz, este important ca transformatoarele utilizate pentru crearea neutrului artificial să fie corect dimensionate. Acestea trebuie să posede în regim normal rezistență mare și pierderi minimale în schema de secvență directă, iar în regim de defect monofazat – rezistență mică în schema de secvență homopolară.

În primul rând se propune utilizarea unui transformator de putere special cu schema de conexiune a înfășurărilor stea-triunghi, numit *transformator de neutru artificial (TNA)* [20, 21].

Punctul neutru artificial se formează prin conectarea acestui transformator la barele de distribuție MT ale stației de transformare (fig.1). În punctul neutru format se conectează bobina de stingere a arcului electric (BSA) (fig.1, *a* și *c*), un rezistor special (fig.1, *b* și *d*), sau bobina de stingere a arcului electric în paralel cu un rezistor (fig.1, *e*, *f* și *g*).

Utilizarea transformatoarelor TNA oferă posibilitatea racordării la secundarul acestora și a consumatorilor serviciilor proprii, ceea ce trebuie de luat în calcul la dimensionarea TNA.

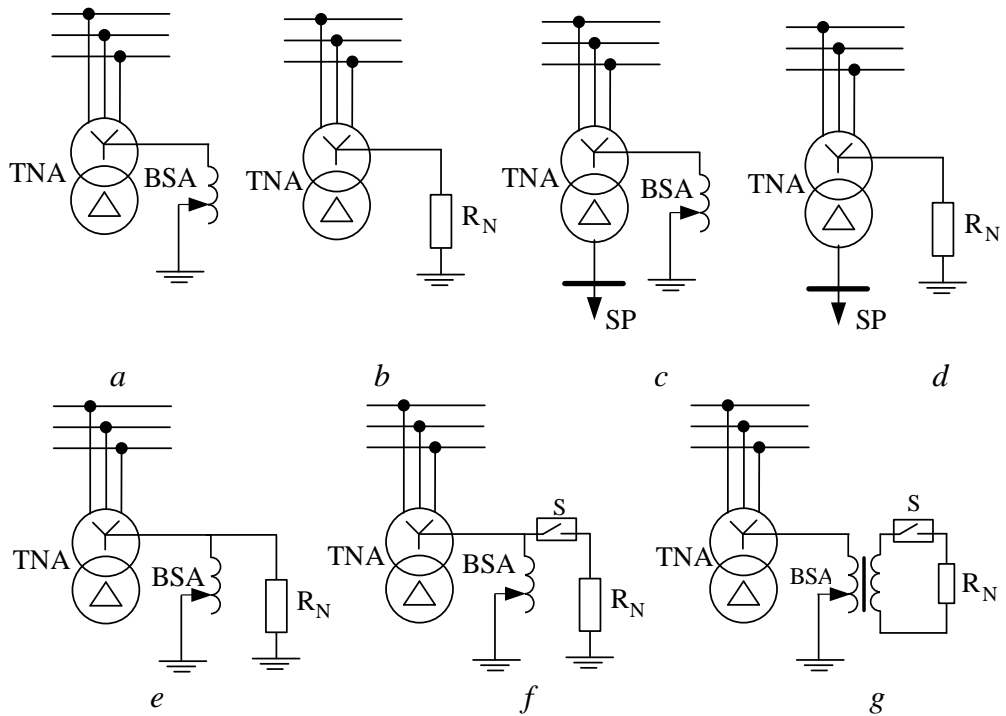


Fig. 1. Utilizarea TNA cu schema stea-triunghi pentru crearea punctului neutru artificial
unde: TNA – transformator de neutru artificial; BSA – bobina de stingere a arcului electric;
 R_N – rezistor de neutru; S – cheie.

Altă modalitate de creare a neutrului artificial este utilizarea unui transformator special cu conexiunea înfășurării în zig-zag fără înfășurare secundară și cu punctul neutru accesibil, numit *filtru de secvență homopolară* (FSH) [22, 23]. Construcția FSH asigură valori mari ale reactanțelor înfășurărilor pentru curenții de secvență directă și inversă (X_1 și X_2) și valori foarte mici ale reactanțelor de secvență homopolară (prin bobinarea inversă a semiînfășurărilor pe coloane, fluxurile magnetice se defazează la 180° și, ca urmare, fluxurile rezultante devin teoretic nule (fig.2).

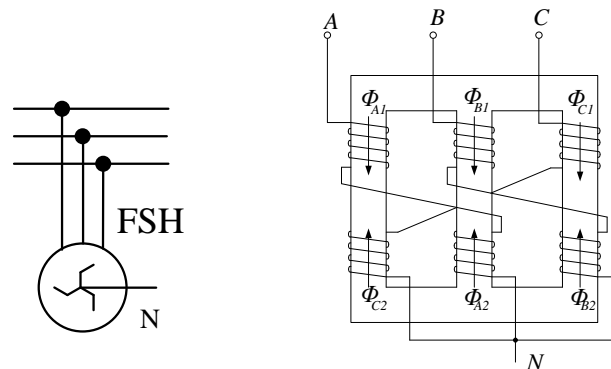


Fig. 2. Schema principală a transformatorului cu conexiunea înfășurării în zig-zag (FSH)

Pentru conectare la neutru a rezistenței de joasă tensiune se propune utilizarea TNA cu schema de conexiune a înfășurărilor stea-triunghi deschis (fig.3). Înfășurarea primară se conectează în stea și punctul neutru se leagă direct la pământ. La rândul său, înfășurarea secundară

se conectează în triunghi deschis, în circuitul cărui se conectează rezistorul de joasă tensiune și organele de protecție [22-24]. Trebuie de menționat că miezul feromagnetic al acestui transformator are o construcție specială, numită *în manta*. Transformatoarele cu miezul feromagnetic în manta sunt menite să suporte intensități foarte mari ale fluxului magnetic, și au o rezistență magnetică scăzută, ceea ce permite reducerea pierderilor de mers în gol și evitarea supraîncălzirii la punerea unei faze la pământ.

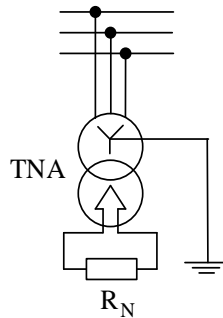


Fig. 3. Schema de conectare la rețea a TNA stea-triunghi deschis

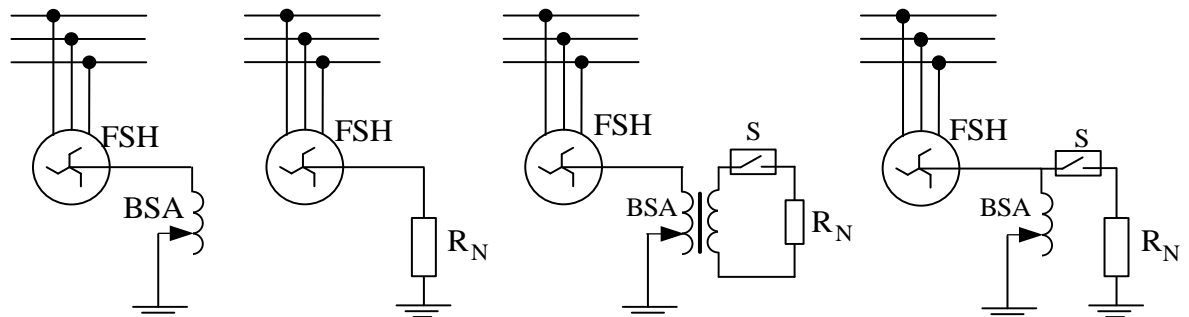


Fig. 4. Schemele de creare a neutrului cu ajutorul transformatorului cu conexiunea înfășurării în zig-zag FSH

Ulterior, pentru fiecare mod de tratare a neutrului și tipul transformatorului utilizat (TNA, FSH) se prezintă metodologia de alegere a puterii nominale ale acestora, sunt analizate și determinate condițiile de racordare a echipamentului de neutru.

Pentru reducerea numărului de deconectări în cazul defectelor monofazate trecătoare, în rețelele electrice aeriene cu neutru tratat prin rezistor cu valoare mare a rezistenței se propune implementarea soluției „întreruptor șunt”. Soluția permite selectarea și eliminarea a circa 75-80 % din defectele monofazate, ca și în cazul RAR (automatizarea Reanclanșarea Automată a Rezervei), dar fără deconectarea consumatorilor.

Capitolul 3 „Solicitarea rețelelor electrice în funcție de modul de tratare a neutrului”

În rețelele de distribuție cu tensiunea 6-35 kV defectele monofazate constituie 75-80% din totalul defectelor de avarie. Din acestea, punerile metalice la pământ constituie aproximativ 10-15%, celelalte fiind însoțite de arc electric la locul defectului [24]. Probabilitatea autostingerii

arcului, durata de ardere, caracterul intermitent al arcului, valoarea curentului de punere la pământ determină supratensiuni pe fazele sănătoase, care pot atinge valori de 3-3,5 din tensiunea de fază U_f , precum și consecințe ale acestor supratensiuni (străpungerea izolației în cele mai slabe locuri ale rețelei electrice și transformarea defectului monofazat în scurtcircuite polifazate). Acțiunea termică a curentului la locul punerii la pământ poate cauza incendii. Pentru evitarea sau reducerea consecințelor defectelor monofazate și supratensiunilor ce le însoțesc este necesar de a crea condiții în care arcul electric la locul defectului se va autostinge sau va arde stabil, iar curentul de punere la pământ va fi limitat până la valori nepericuloase.

Soluționarea acestor probleme necesită un studiu minuțios al proceselor ce se dezvoltă în rețelele de distribuție în cazul defectelor monofazate.

În același timp, efectuarea unor încercări de măsurare a parametrilor de regim în aceste condiții este complicată și poate provoca situații de avarie cu consecințe grave, mai ales când echipamentele rețelei electrice au un grad avansat de uzură. În acest caz se impune modelarea matematică a regimurilor rețelei și simularea acestora în programe specializate.

În cadrul acestui capitol sunt elaborate modelele matematice de calcul al parametrilor de regim ai rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV pentru diferite modalități de tratare a neutrului, ceea ce a permis modelarea matematică a diferitelor regimuri de funcționare a rețelei, identificarea modului optimal de tratare a neutrului evitând încercări experimentale.

Sunt elaborate modelele matematice de funcționare a rețelelor electrice de distribuție în regim stabilizat și tranzitoriu de defect monofazat și normal de funcționare pentru diferite moduri de tratare a neutrului.

Pentru a obține relațiile analitice ale mărimilor de stare în regim stabilizat de defect monofazat s-a folosit schema echivalentă de calcul al cărei structură se obține pe bază relațiilor dintre componentele simetrice ale tensiunii, și respectiv ale curentului, considerându-se condițiile specifice acestui defect și valabile la locul defectului (fig.5). În această schemă D, I și H reprezintă schemele echivalente ale rețelei în raport cu locul defectului, valabile pentru cele trei componente simetrice: directă, inversă și homopolară.

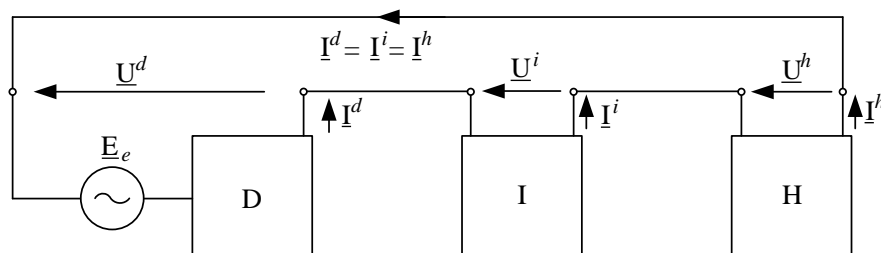


Fig. 5. Schema echivalentă pentru defectul monofazat în rețea

După o serie de transformări s-au obținut tensiunile pe fazele rețelei în regim stabilizat de defect monofazat:

$$\underline{U}_B = \underline{a}^2 \cdot \underline{E}_e + (\underline{Z}^d - \underline{Z}^h) \cdot \frac{\underline{E}_e}{2 \cdot \underline{Z}^d + \underline{Z}^h} = \underline{E}_e \cdot \left(\underline{a}^2 + \frac{\underline{Z}^d - \underline{Z}^h}{2 \cdot \underline{Z}^d + \underline{Z}^h} \right) = \underline{k}_B^{def} \cdot \underline{E}_e; \quad (1)$$

$$\underline{U}_C = \underline{a} \cdot \underline{E}_e + (\underline{Z}^d - \underline{Z}^h) \cdot \frac{\underline{E}_e}{2 \cdot \underline{Z}^d + \underline{Z}^h} = \underline{E}_e \cdot \left(\underline{a} + \frac{\underline{Z}^d - \underline{Z}^h}{2 \cdot \underline{Z}^d + \underline{Z}^h} \right) = \underline{k}_C^{def} \cdot \underline{E}_e; \quad (2)$$

$$\underline{k}_B^{def} = \underline{a}^2 + \frac{\underline{Z}^d - \underline{Z}^h}{2 \cdot \underline{Z}^d + \underline{Z}^h}; \quad \underline{k}_C^{def} = \underline{a} + \frac{\underline{Z}^d - \underline{Z}^h}{2 \cdot \underline{Z}^d + \underline{Z}^h}, \quad (3)$$

unde: \underline{k}_B^{def} , \underline{k}_C^{def} – coeficienții de tensiune la un defect monofazat.

Acești coeficienți sunt mărimi complexe, modulul lor prezintă multiplul de creștere a tensiunilor pe fazele sănătoase la un defect monofazat față de t.e.m de fază corespunzătoare secțiunii cu defect, dar în lipsa defectului, adică tensiunea de fază a fazei A.

Curentul de defect monofazat (de punere la pământ):

$$\underline{I}_{PP} = \underline{I}^d + \underline{I}^i + \underline{I}^h. \quad (4)$$

Tensiunea pe *neutrul electric* al rețelei (neutrul fizic poate lipsi – când înfășurarea secundară a transformatorului este conectată în triunghi) va fi mereu egală cu tensiunea homopolară, întrucât sistemul de secvență directă și, respectiv, inversă de tensiuni nu conduc la deplasarea neutrului:

$$\underline{U}_N = \underline{U}^h. \quad (5)$$

La apariția sistemului homopolar, neutrul își modifică potențialul de la 0 la \underline{U}^h .

În continuare, rezultatele obținute se aplică pentru calculul mărimilor de stare în timpul defectului monofazat într-o rețea cu neutrul izolat (sunt valabile relațiile 1-5) și neutrul tratat printr-o impedanță. Pentru cazul neutrului tratat prin impedanță, este necesar de calculat atât impedanțele de diferite secvențe, cât și de recalculat t.e.m., introdusă în schema complexă transfigurată. Relațiile de calcul sunt obținute și prezentate în lucrare. Curentul de punere la pământ, tensiunile pe fazele sănătoase și tensiunea de deplasare a neutrului, la fel ca și în cazul precedent, se vor determina cu relațiile (1-5).

Un interes deosebit îl prezintă procesele tranzitorii la punerea unei faze la pământ prin arc electric în rețelele de medie tensiune. Fenomenele care au loc în aceste cazuri conduc la apariția supratensiunilor periculoase. Pentru elaborarea modelului matematic s-au analizat procesele tranzitorii la prima străpungere a izolației și la stingerea arcului electric pentru diferite modalități

de tratare a neutrului, situații în cadrul cărora procesele tranzitorii se manifestă mai pronunțat cu valori mai mari ale supratensiunilor.

La prima străpungere a fazei tensiunea pe faza avariata devine egală cu zero momentan. Tensiunile fazelor sănătoase, trecând un proces oscilant cu atenuare, vor atinge valorile tensiunilor de linie. Matematic, aceste tensiuni pot fi exprimate ca sumă a două componente, forțată și liberă. Componentele forțate sunt tensiunile care se stabilesc pe fazele sănătoase în regim stabilizat de punere la pământ:

$$\left. \begin{aligned} u_{Bfr}(t) &= \sqrt{3} \cdot E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 210^\circ); \\ u_{Cfr}(t) &= \sqrt{3} \cdot E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 150^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Componentele libere se caracterizează prin amplitudinea U_{ml} , coeficientul de atenuare δ_l și frecvență proprie de oscilație ω_l :

$$\left. \begin{aligned} u_{Blb}(t) &= U_{Bml} \cdot e^{-\delta_l \cdot (t-t_1)} \cdot \cos \omega_l \cdot (t-t_1); \\ u_{Clb}(t) &= U_{Cml} \cdot e^{-\delta_l \cdot (t-t_1)} \cdot \cos \omega_l \cdot (t-t_1). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Tensiunile pe fazele sănătoase vor fi:

$$\left. \begin{aligned} u_B(t) &= \sqrt{3} \cdot E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 210^\circ) - E_m \cdot (1-k_C) \cdot e^{-\delta_l \cdot (t-t_1)} \cdot \cos \omega_l \cdot (t-t_1); \\ u_C(t) &= \sqrt{3} \cdot E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 150^\circ) - E_m \cdot (1-k_C) \cdot e^{-\delta_l \cdot (t-t_1)} \cdot \cos \omega_l \cdot (t-t_1). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Din analiza relațiilor obținute rezultă că supratensiunea care poate apărea pe fazele sănătoase la prima străpungere depinde de câțiva factori: de momentul străpunerii, de coeficientul de atenuare δ_l , de pulsația componentei libere ω_l și de raportul între capacitățile mutuale și cele homopolare. Considerând condițiile cele mai nefavorabile, se poate de determinat supratensiunea maximă la prima străpungere. Aceasta va avea loc atunci, când: tensiunea pe faza defectată va atinge valoarea de amplitudine E_m , neglijând coeficientul de atenuare ($\delta_l=0$) și capacitățile mutuale, iar maximul componentei libere coincide cu momentul, când componenta forțată atinge valoarea de amplitudine, adică $\sqrt{3} \cdot E_m$.

În urma analizei variației componentelor forțată și libera s-a obținut relația pentru tensiunea pe neutru:

$$u_N(t) = -E_m \cdot \sin \omega \cdot t - \frac{2}{3} E_m \cdot (1-k_C) \cdot e^{-\delta_l \cdot (t-t_1)} \cdot \cos \omega_l \cdot (t-t_1). \quad (9)$$

Dacă străpungerea are loc atunci, când tensiunea pe faza defectată atinge valoarea de amplitudine, se neglijează atenuarea, capacitățile mutuale și se presupune că frecvența componentei libere este cu mult mai mare ca cea industrială, valoarea maximă posibilă a supratensiunii pe neutru rezultă:

$$U_{N_{\max}} \approx 1,67 \cdot E_m . \quad (10)$$

Pentru determinarea parametrilor procesului tranzitoriu s-a utilizat metoda operațională care presupune alcătuirea schemei echivalente a rețelei electrice. Elementele pasive, care au capacitatea de a acumula energie (în câmpul magnetic sau electric), care și provoacă procesul tranzitoriu, se introduc în schemă ca surse de energie care alimentează componentele libere ale procesului tranzitoriu. Acestor surse li se atribuie valori corespunzătoare începutului procesului tranzitoriu. Trecându-se de la funcția origine la funcția imagine, se obține un circuit compus de curent continuu, pentru care nu este o problemă de a determina curenții în ramuri și tensiunile pe elemente. În final se realizează o trecere de la imagine la origine și se determină parametrii reali ai procesului tranzitoriu.

După stingerea arcului electric, în caz general, la fel va avea loc un proces tranzitoriu. În cazul, când stingerea arcului electric are loc la trecerea tensiunii pe neutrul rețelei prin zero, procesul tranzitoriu practic nu va avea loc. Pentru determinarea posibilelor supratensiuni care apar la stingerea arcului s-a analizat caracterul de restabilire a tensiunii pe faza defectă.

Caracterul procesului tranzitoriu la stingerea arcului depinde pronunțat de rezistența în neutrul rețelei. Tensiunea de restabilire pe faza defectată se prezintă prin componenta forțată și cea liberă:

$$u_A(t) = u_{Afr}(t) + u_{Alb}(t) . \quad (11)$$

Componenta forțată este determinată de t.e.m. a fazei A și de tensiunea pe neutrul:

$$u_{Afr}(t) = e_A(t) + u_N(t) . \quad (12)$$

Componenta liberă este determinată de amplitudinea, coeficientul de atenuare și de pulsația componentei libere:

$$u_{Alb}(t) = U_{mAlb} \cdot e^{-\delta_2 \cdot (t-t_2)} \cdot \cos \omega_2 \cdot (t-t_2) . \quad (13)$$

În final, pentru tensiunea pe faza defectată, se obține relația:

$$u_A(t) = e_A(t) + u_N(t) - [e_A(t_2) + u_N(t_2)] \cdot e^{-\delta_2 \cdot (t-t_2)} \cdot \cos \omega_2 \cdot (t-t_2) . \quad (14)$$

În cazul neutrului izolat, nivelul supratensiunilor, atât pe faza defectată, cât și pe fazele sănătoase, va fi determinat de componenta forțată (de tensiunea pe neutrul la momentul t_2), și maximul acestora poate atinge valoarea $2E_m$.

În cazul neutrului compensat, după stingerea arcului BSA are o influență determinantă asupra procesului tranzitoriu de modificare a tensiunii pe neutrul și pe faza defectată. Procesul tranzitoriu de modificare a tensiunii pe neutrul și pe faza defectată a fost examinat în baza schemei

echivalente corespunzătoare, care a permis obținerea relațiilor matematice. În rezultatul unor transformări matematice succesive au fost obținute relațiile de calcul:

$$u_N(t) = U_{Nm} \cdot e^{-\frac{\delta}{2} \cdot \omega t} \cdot \sin(\omega_{st} t + \varphi_{N0}), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u_A(t) &= e_A(t) + u_N(t) + U_{Am} \cdot e^{-\delta_2 \cdot (t - \frac{T_1}{2})} \cdot \cos \omega_2(t - \frac{T_1}{2}) = \\ &= E_m \cdot \sin \left[\omega \cdot (t - \frac{T_1}{2}) + \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot \omega} \right] + U_{Nm} \cdot e^{-\frac{\delta}{2} \cdot \omega (t - \frac{T_1}{2})} \cdot \sin(\omega_{st} t + \varphi_{N0}) + \\ &\quad + U_{Am} \cdot e^{-\delta_2 \cdot (t - \frac{T_1}{2})} \cdot \cos \omega_2(t - \frac{T_1}{2}). \end{aligned} \quad (16)$$

Decurgerea procesului tranzitoriu depinde, în mare măsură, de momentul stingerii arcului electric: la prima trecere prin zero a componentei libere a curentului de punere la pământ sau la trecerea prin zero a componentei forțate a acestuia, precum și de parametrii procesului tranzitoriu: δ , ω_1 , ω_2 , δ . În baza relațiilor deduse s-au obținut variațiile curentului prin neutru și a tensiunilor pentru diferite valori ale parametrilor procesului tranzitoriu.

Pentru analiza proceselor tranzitorii, care au loc în rețelele tratate prin rezistor, s-a utilizat schemă echivalentă a rețelei de medie tensiune cu neutru tratat prin rezistor. În urma modelării matematice a procesului tranzitoriu se constată, că valoarea rezistorului influențează puțin frecvența oscilațiilor libere, deci, și procesul tranzitoriu la aprinderea arcului electric.

Condițiile care asigură scurgerea totală a surplusului de sarcini electrice într-o semiperioadă a frecvenței industriale, după care poate din nou să se reaprindă arcul, au fost stabilite în baza schemei echivalente a rețelei cu neutru tratat prin rezistor după stingerea arcului electric. Ecuatiile diferențiale, care descriu acest proces și demonstrează efectul pozitiv al rezistorului atunci când componenta activă a curentului, creată de acesta este aproximativ egală cu componenta capacitivă a curentului sau este mai mare decât aceasta. Tensiunea pe neutru într-un ciclu de aprindere și stingere al arcului electric s-a determinat pe baza teoriei Petersen:

$$U_{N\max}^{(n)} = u_{N0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_N}} = \frac{2}{3} U_{B\max}^{(n-1)} \cdot e^{-\frac{T/2}{(G_{N^*} + \delta)\omega}} = \frac{2}{3} U_{B\max}^{(n-1)} \cdot e^{-\pi(\delta + G_{N^*})}. \quad (17)$$

Supratensiunea maximă de calcul pentru $k_C = 0,2$, $\delta = 0,05$, $k_{\delta_1} = 0,1$, $G_{N^*} = 1$:

$$\begin{aligned} U_{B\max}^{(n)} &= E_m \cdot \frac{1,5 + (1 - k_C) \cdot (1 - k_{\delta_1})}{1 - \frac{2}{3} \cdot (1 - k_C) \cdot (1 - k_{\delta_1}) \cdot e^{-\pi(\delta + G_{N^*})}} = \\ &= E_m \cdot \frac{1,5 + (1 - 0,2) \cdot (1 - 0,1)}{1 - \frac{2}{3} \cdot (1 - 0,2) \cdot (1 - 0,1) \cdot e^{-\pi(0,05 + 1)}} = 2,26 \cdot E_m. \end{aligned} \quad (18)$$

Conform teoriei Peters-Slepian influența rezistorului constă nu numai în atenuarea rapidă a tensiunii pe neutru, dar și în modificarea defazajului între t.e.m. pe faza defectată și componenta forțată a curentului de punere la pământ. Acesta din urmă, duce la apariția unui decalaj de timp între momentul trecerii prin zero a componentei forțate a curentului și momentul de atingere a maximumului t.e.m. pe faza defectată, având ca rezultat micșorarea tensiunii remanente pe neutru la rețea. În momentul t_1 se aprinde arcul electric și are loc un proces tranzitoriu. La momentul stingerii arcului (t_2), acest proces deja atenuază. Tensiunea pe neutru la momentul t_2 rezultă:

$$u_N(t_2) = -E_m \cdot \sin(2\pi - \beta) = E_m \cdot \sin(\beta). \quad (19)$$

Mărimea β prezintă unghiul de defazaj între tensiunea pe neutru și componenta forțată a curentului de punere la pământ, valoarea acesteia va fi determinată de raportul între componenta capacitivă și activă a curentului de punere la pământ:

$$\beta = \arctg \frac{I_{C1}}{I_{a1}} = \arctg \frac{3\omega C_0}{3G_0 + G_N} = \arctg \frac{1}{\partial + G_{N*}}, \quad (20)$$

aici indicele 1 indică armonica de frecvență industrială. Relația (20) demonstrează dependența dintre conductanța rezistorului G_N și unghiul β . Odată cu mărirea valorii rezistenței rezistorului se micșorează unghiul β , ceea ce determină reducerea tensiunii remanente pe neutru după stingerea arcului, respectiv reducerea supratensiunilor pe fazele sănătoase la următoarea aprindere a arcului.

Pentru determinarea supratensiunilor în conformitate cu teoria Beleacov, s-a luat în considerație faptul, că componenta forțată a tensiunii pe fazele sănătoase, la momentul reaprinderii arcului (t_3) constituie $1,5E_m$, iar la determinarea componentei libere s-a luat în considerație atenuarea introdusă de către rezistor:

$$U_{B\max} = 1,5E_m + \left[E_m + 1,2E_m \cdot e^{-\pi(\partial + G_{N*})} \right] \cdot (1 - k_C) \cdot (1 - k_{\delta}). \quad (21)$$

Din seriile de curbe obținute s-a constatat că în rețeaua electrică cu neutru tratat prin rezistor, în ipoteza apariției arcului electric intermitent, supratensiunile nu depășesc $2E_m$, ceea ce prezintă un avantaj în comparație cu alte metode de tratare a neutruului. Important de menționat, că probabilitatea apariției arcului electric intermitent este foarte scăzută, deoarece curentul de punere la pământ atinge valori considerabile și arcul arde stabil. Acest regim poate fi considerat staționar și nu tranzitoriu. Protecția va fi ajustată la deconectare, ceea ce reduce considerabil influența negativă a acțiunii îndelungate a supratensiunilor. Totodată, aceasta reduce riscul electrocutării oamenilor și animalelor, deoarece defectul se elimină în câteva secunde, funcție de temporizarea protecției.

Procesele care au loc la punerea unei faze la pământ în regimul tratării neutruului prin BSA în paralel cu un rezistor nu se deosebesc principial de cazul tratării neutruului doar prin BSA.

Aceasta se explică prin faptul, că prezența rezistorului schimbă doar conductanța între neutru și pământ, ceea ce relațiile deduse pentru cazul tratării doar prin BSA sunt valabile și în acest caz, adăugând conductanța rezistorului (G_R). Acest regim de tratare a neutrilor este actual în cazul liniilor aeriene, unde are loc nesimetria capacităților fază-pământ. După cum s-a demonstrat, nesimetria pronunțată determină deplasarea neutrilor ce depășește tensiunea admisibilă de $0,15U_{f,nom}$ [26]. Conectarea în paralel cu BSA a unui rezistor permite acordarea BSA în rezonanță cu păstrarea tensiunii pe neutru în limitele normelor în vigoare. Totodată, prezența rezistorului în situația când nesimetria fazelor rețelei este mică, permite micșorarea supratensiunilor la punerea la pământ a fazei prin arc electric.

Este necesar de menționat, de asemenea, că instalarea rezistorului este cu mult mai convenabilă din punct de vedere economic decât instalarea unei BSA cu acordare fină automată.

Capitolul 4 „**Alegerea modului eficient de tratare a neutrilor în rețelele de distribuție. Studii de caz**”.

Elaborarea în capitolul 3 a modelelor matematice a proceselor fizice în rețelele electrice de distribuție pentru diferite moduri de tratare a neutrilor a condus la necesitatea unei verificări a acestor modele pentru o rețea concretă de distribuție.

Studiul de caz, realizat în acest scop, pentru rețelele de distribuție 6-35 kV din Republica Moldova, prevede calculul regimurilor rețelei pentru diferite moduri de tratare a neutrilor acesteia, modelarea acestor regimuri în programul Matlab Simulink, compararea rezultatelor obținute și recomandărilor privind modul eficient de tratare a neutrilor în condiții concrete.

Studiul de caz a fost realizat pentru stația electrică „Centrală 110/10 kV mun. Bălți” a rețelelor RED-NORD.

La stație sunt instalate: două transformatoare de putere de tip ТДН-16000/110/11, cu parametrii: $\Delta P_{sc}=85$ kW, $U_{sc}=10,5\%$ și schema de conexiune Y0/ Δ -11; la fiecare secție de bare 10 kV sunt conectate câte un transformator de creare a neutrilor artificial (TNA) de tip ТМІС-630/10,5/0,23 cu parametrii: $\Delta P_{sc}=8,63$ kW, $U_{sc}=5,5\%$, $\Delta P_0=0,997$ kW, $I_0\%=0,49\%$, $I_{1n}=34,6$ A și schema de conexiune Y0/ Δ -11; în neutrul fiecărui TNA sunt conectate două BSA de tip: P3ДCOM-380/10 și P3ДПОМ-480/10.

Capacitățile sumare pe fiecare din secțiile instalației de distribuție ale stației de transformare obținute prin calcul constituie: pentru secția 1 – $C_{01}=13,34$ μ F; pentru secția 2 – $C_{02}=13$ μ F, curentul de punere la pământ $I_{pp}=73$ A.

Calculul s-a realizat pentru secția 1, feederul nr.2. Schema feederului nr.2 și locul de punere la pământ sunt indicate în fig. 6.

Pentru varianta tratării neutrlui prin BSA combinat cu un rezistor de rezistență mare se determină rezistența acestuia și impedanța circuitului combinat, considerând că BSA funcționează în regim de supracompensare ($k=1,1$), rezultă că curentul capacitiv nu va depăși 8 A.

Din catalogul tehnic se alege un rezistor cu valoarea rezistenței $R_n=500 \Omega$ astfel, încât curentul prin acesta să nu depășească 10 A.

Impedanța circuitului combinat:

$$\underline{Z}_N = \frac{\underline{Z}_{BSA} \cdot R_N}{\underline{Z}_{BSA} + R_N} = \frac{(1,033 + j76,426) \cdot 500}{(1,033 + j76,426) + 500} = 12,377 + j74,38 \Omega.$$

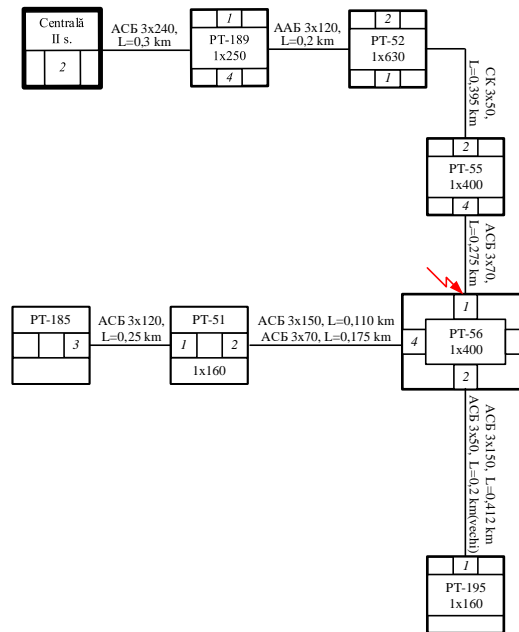


Fig. 6. Schema structurală a feederului nr.2 de la ST „Centrală 110/10kV mun. Bălți”

Studiul comparativ al regimurilor rețelei și calculul mărimilor de stare pentru variantele de tratare a neutrlui: izolat, compensat, rezistiv și combinat s-a realizat conform algoritmului: determină impedanțelor elementelor rețelei electrice pentru diferite secvențe, conform relațiilor obținute în capitolul 3, calculul curentului de punere la pământ, a tensiunilor pe fazele sănătoase și tensiunii pe neutru, modelarea regimului respectiv în programul Matlab Simulink, construirea diagramelor fazoriale și compararea rezultatelor obținute. Rezultatele obținute prin calcul și simulare sunt următoarele (tab. 1-5):

Tabelul 1. Datele comparative, neutru izolat

	I_{PP}, A	U_A, V	U_B, kV	U_C, kV	U_N, kV
Calcul	$73,132 \cdot e^{j89,86^\circ}$	0	$10,05 \cdot e^{-j150,29^\circ}$	$10,07 \cdot e^{j150,08^\circ}$	$5,817 \cdot e^{j179,86^\circ}$
Simulare	$72,94 \cdot e^{j89,64^\circ}$	0	$10,02 \cdot e^{-j150,3^\circ}$	$10,04 \cdot e^{j150^\circ}$	-

Tabelul 2. Datele comparative, neutru tratat prin BSA

	I_{PP}, A	U_A, V	U_B, kV	U_C, kV	U_{N2}, kV
Calcul	$2,424 \cdot e^{j4,5^\circ}$	0	$9,998 \cdot e^{-j150,01^\circ}$	$10 \cdot e^{j149,99^\circ}$	$5,536 \cdot e^{-j178,88^\circ}$
Simulare	$2,479 \cdot e^{j4,488^\circ}$	0	$9,994 \cdot e^{-j150^\circ}$	$9,996 \cdot e^{j149,9^\circ}$	$5,535 \cdot e^{-j178,7^\circ}$

Tabelul 3. Datele comparative, neutru tratat prin rezistor cu rezistență de valoare mică

	I_{PP}, A	U_A, V	U_B, kV	U_C, kV	U_{N2}, kV
Calcul	$104,184 \cdot e^{j41,3^\circ}$	0	$9,989 \cdot e^{-j150,55^\circ}$	$10,08 \cdot e^{j149,67^\circ}$	$5,668 \cdot e^{j176,93^\circ}$
Simulare	$103,2 \cdot e^{j48,8^\circ}$	0	$9,979 \cdot e^{-j150,4^\circ}$	$10,04 \cdot e^{j149,7^\circ}$	$5,62 \cdot e^{j176,8^\circ}$

Tabelul 4. Datele comparative, BSA în paralel cu un rezistor de rezistență mare

	I_{PP}, A	U_A, V	U_B, kV	U_C, kV	U_{N2}, kV
Calcul	$13,04 \cdot e^{j1,45^\circ}$	0	$9,991 \cdot e^{-j150,05^\circ}$	$10 \cdot e^{j149,93^\circ}$	$5,518 \cdot e^{j179,3^\circ}$
Simulare	$12,84 \cdot e^{j2,23^\circ}$	0	$9,989 \cdot e^{-j150,1^\circ}$	$9,996 \cdot e^{j149,9^\circ}$	$5,514 \cdot e^{-j179,3^\circ}$

Tabelul 5. Mărimile de stare a rețelei electrice la un defect monofazat pentru diferite modalități de tratare a neutrului, obținute prin calcul

Regimul neutrului	I_{PP}, A	U_A, kV	U_B, kV	U_C, kV	U_{N1}, kV
Neutru izolat	$73,132 \cdot e^{j89,86^\circ}$	0	$10,05 \cdot e^{-j150,29^\circ}$	$10,07 \cdot e^{j150,08^\circ}$	$5,817 \cdot e^{j179,86^\circ}$
Neutru tratat prin BSA	$2,424 \cdot e^{j4,5^\circ}$	0	$9,998 \cdot e^{-j150,01^\circ}$	$10 \cdot e^{j149,99^\circ}$	$5,536 \cdot e^{-j178,88^\circ}$
Neutru tratat prin rezistor de valoare mică	$104,184 \cdot e^{j41,3^\circ}$	0	$9,989 \cdot e^{-j150,55^\circ}$	$10,08 \cdot e^{j149,67^\circ}$	$5,668 \cdot e^{j176,93^\circ}$
Neutru tratat prin BSA și rezistor de valoare mare	$13,04 \cdot e^{j1,45^\circ}$	0	$9,991 \cdot e^{-j150,05^\circ}$	$10 \cdot e^{j149,93^\circ}$	$5,771 \cdot e^{j179,92^\circ}$

Conform expresiilor, deduse în capitolul 3, au fost determinate, de asemenea, valorile tensiunii de deplasare a neutrului U_N și a curentului prin neutru I_N în regim normal de funcționare a rețelei, în cazul tratării neutrului prin BSA și prin BSA în paralel cu un rezistor de valoare mare, la o nesimetrie a rețelei electrice la inegalitatea capacităților fază-pământ de 5%. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.

Coresponderea valorilor obținute prin calcule, realizate în baza modelului matematic elaborat, și rezultatele obținute prin simularea regimurilor de tratare a neutrului în Simulink sunt în limita erorilor admisibile, adică practic identice. Totodată, modelul de simulare poate fi

dezvoltat în continuare pentru obținerea unei corespunderi mai ample a acestuia cu procese fizice reale în rețele.

Tabelul 6. Rezultatele calculului parametrilor de regim

Modul de tratare	Tensiunea pe neutru în regim normal de funcționare la nesimetria capacităților fazelor față de pământ de 5%, U_N, V	Tensiunea pe neutru în regim de defect monofazat, U_N, V	Curentul de punere la pământ, I_{PP}, A
Neutru tratat prin BSA	$U_N = 1846 V (32\% \text{ din } U_f)$	$5,536 \cdot e^{-j178,88^\circ}$	$2,424 \cdot e^{j4,5^\circ}$
Neutru tratat prin BSA și rezistor de valoare mare	$U_N = 526,5 V (9\% \text{ din } U_f)$	$5,771 \cdot e^{j179,92^\circ}$	$13,04 \cdot e^{j1,45^\circ}$

Rezultatele obținute în cadrul studiului realizat au arătat, că regimul rețelei cu neutru compensat (cu BSA) este rațional în cazul defectelor monofazate. Totodată, în regim normal de funcționare BSA determină creșterea tensiunii de deplasare a neutrilor și, eventual, depășirea valorii reglementate a acestuia.

În același timp, tratarea combinată a neutrilor (BSA în paralel cu unui rezistor de 500Ω pentru cazul examinat) duce la micșorarea tensiunii pe neutru rețelei (în regim normal) de aproximativ 3,5 ori, ceea ce determină un regim mai favorabil de funcționare a rețelei și permite integrarea în limitele valorilor tensiunii de deplasare a neutrilor, stipulate de Normele în vigoare [26], p.542 ceea ce este deosebit de important în caz de nesimetrie a fazelor rețelei.

O influență majoră asupra mărimilor de stare la un defect monofazat în rețelele electrice de medie tensiune o are reactanța capacitivă, care poate să se modifice pe parcursul exploatării rețelelor electrice.

CONCLUZII GENERALE

1. În urma realizării unui studiu amplu bibliografic în domeniul tratării neutrului rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV, cu accent pe avantajele și dezavantajele fiecărui mod de tratare, prin raportarea la reglementări și la soluțiile practicate pe plan mondial s-a stabilit: a) neutrul izolat este un mod de tratare depășit și periculos (supratensiunile pot atinge nivelul de 4,27Em), actualmente exclus din exploatare în majoritatea țărilor dezvoltate; b) lipsa unor criterii unice tehnice și tehnico-economice de alegere a modului de tratare a neutrului rețelelor electrice (capitolul 1 [Dobrea I., 2017; 2019]).
2. Cercetările realizate pun în evidență necesitatea accesului la punctul neutru pentru racordarea la acesta a bobinei de stingere a arcului electric BSA și/sau a rezistorului de neutru, fapt ce a avut ca efect sistematizarea și înaintarea propunerilor privind modalitățile de creare a neutrului artificial cu utilizarea unor transformatoare speciale, precum și metodologia de dimensionare a lor (capitolul 2 [Dobrea I., 2014]).
3. Din studiul efectuat rezultă că soluția aleasă pentru tratarea neutrului rețelei de medie tensiune, regimul de defect monofazat și fenomenele ce îl însoțesc au o importanță decisivă asupra continuității și calității energiei electrice distribuite la consumatorii finali și asupra solicitării rețelei electrice. Soluția aleasă influențează parametri de regim a rețelei atât în regim tranzitoriu cât și stabilizat în funcție de condițiile în care are loc defectul (capitolul 3 [Dobrea I. et. al., 2017; Dobrea I., 2019]).
4. Rezultatul obținut care contribuie la soluționarea problemei științifice importante confirmă că modul de tratare a neutrului determină condițiile în care au loc defectele monofazate și evoluția fenomenelor în care arc electric la locul defectului se va autostinge sau va arde stabil, iar curentul de punere la pământ va fi limitat până la valori nepericuloase (capitolul 3 [Dobrea I., 2019]).
5. Rezultatul obținut care contribuie la soluționarea problemelor științifice importante constă în elaborarea modelelor matematice de funcționare a rețelelor electrice de distribuție în regim stabilizat și tranzitoriu de defect monofazat și normal de funcționare pentru diferite moduri de tratare a neutrului, fapt care permite evitarea încercărilor experimentale în condițiile de uzură avansată a izolației rețelelor din RM (capitolul 3 [Dobrea I. et al., 2013, Dobrea I., 2019]).
6. O concluzie importantă obținută în baza modelelor matematice dezvoltate - prezența rezistorului în neutrul rețelei reduce valoarea supratensiunilor tranzitorii, amortizându-le foarte rapid, anulând în același timp condițiile de apariție a unor supratensiuni temporare de rezonanță pe armonica fundamentală (subcapitolele 3.3, 3.4 [Dobrea I., 2019; Dobrea I. et al., 2023]).
7. Analiza prin simulare numerică a regimului tranzitoriu la un defect monofazat a permis stabilirea modului în care diverse mărimi influențează evoluția în timp a tensiunilor și curenților. În cazul defectelor monofazate nete sau prin arc electric, valorile supratensiunilor

depind, în principal, de faza inițială a tensiunii și de valoarea tensiunii în momentul apariției defectului. Această creștere importantă a tensiunii creează condițiile transformării simplei puneri la pământ într-un defect multiplu, cu consecințe grave asupra instalațiilor aferente rețelelor de distribuție (subcapitolele 3.1- 3.3 [Dobrea I. 2006, 2007; Boșneaga V. et al. 2022, 2023]).

8. Simularea numerică în mediul Matlab Simulink a demonstrat că BSA, racordată la neutrul rețelei electrice cu nesimetria accentuată a fazelor determină deplasarea neutrului, depășind valorile reglementate (subcapitolele 3.3, 4.1 [Dobrea I. et al., 2023]).
9. Rezultatele obținute au contribuit la realizarea unui model pentru simularea rețelei de test relevantă utilizând aplicația Matlab, la efectuarea unui set de simulări numerice care acoperă soluțiile investigate de tratare a neutrului (capitolul 4 [Dobrea I. et al., 2023; Boșneaga V. et al. 2022]).

RECOMANDĂRI

În baza cercetărilor efectuate și a rezultatelor obținute, se recomandă:

1. În ipoteza în care nu apare necesitatea trecerii rețelei cu neutrul izolat la o altă soluție de tratare a neutrului, este necesar găsirea de soluții pentru mărirea sensibilității actualelor protecții homopolare de tensiune sau achiziționarea unor protecții moderne pentru detectarea și localizarea selectivă și rapidă a defectelor.
2. Din analiza rezultatelor obținute soluția de tratare a neutrului prin BSA se recomandă a fi utilizată în rețelele electrice aeriene. BSA determină reducerea supratensiunilor și stingerea rapidă a arcului de punere la pământ sau arderea lui stabilă. Totodată, funcționarea îndelungată a rețelei cu faza pusă la pământ poate duce la duble puneri la pământ sau scurtcircuite polifazate, și nu în ultimul rând la pericolul de electrocutare a oamenilor și animalelor.
3. Utilizarea rezistorului cu valoare a rezistenței mare se recomandă în cazul când curenții capacitivi nu depășesc 10 A. Protecția va acționa la semnalizare, deci nu se va reduce gradul de continuitate în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor.
4. În rețelele electrice în cablu în care curenții capacitivi depășesc 10 A și în cazul în care consumatorii admit întreruperea alimentării se recomandă utilizarea rezistorului cu valoare a rezistenței mică. Rezistorul asigură funcționarea selectivă, și relativ simplă, a protecției care funcționează la deconectare. Durata supratensiunilor temporare este de maxim 2 s.
5. Soluția neutrului combinat este indicată în cazul rețelelor mixte al căror curent de punere la pământ este mai mare de 10 A. În acest caz se separa defectele trecătoare de cele permanente și se asigură posibilitatea sesizării selective a liniei cu defect și deconectarea acesteia într-un interval de timp foarte scurt. Rezistorul determină reducerea deplasării neutrului în regim normal de funcționare a rețelei provocată de BSA.

BIBLIOGRAFIE

1. САМОЙЛЕНКО, В., МУХЛЫНИН, Н., ПАЗДЕРИН, А., ЖУРАВЛЕВ, А. Перспективные тенденции развития распределительных сетей. В: журнал „Электроэнергия. Передача и распределение”. Учредители: ООО "Кабель" ISSN: 2218-3116 Номер: S1 (12) Год: 2019.
2. ГУСАРОВ, Л.А. Способы заземления нейтрали источников питания в сетях среднего напряжения, достоинства и недостатки, реальная практика применения в мире. В: "Электрик Инфо" онлайн журнал 2020 г. Disponibil: <https://electric.info/article/1692-sposoby-zazemleniya-neytrali-istochnikov-pitaniya-v-setyah-srednego-napryazheniya.html>
3. НАЗАРЫЧЕВ, А., ТИТЕНКОВ, С., ПУГАЧЕВ, А. Комплексные инновационные решения по заземлению нейтрали в сетях 6-35 кВ В: *Электроэнергия. Передача и распределение*. №3 (36), 2016, с. 33-39.
4. ЦЕЛЕБРОВСКИЙ, Ю., ЧЕРНЕНКО, Н. Анахронизмы в электрических сетях напряжением 6...35 кВ = Anachronisms in electric networks with voltage 6 ... 35 kV / Ю. В. Целебровский, Н. А.. В: *Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций севера России : сб. ст. 2 Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конф., Сургут, 22–23 апр. 2021 г.* – Москва : Знание-М, 2021. – С. 157-165. - ISBN 978-5-00187-067-8.
5. SHIPP, David, ANGELINI, Frank. *Characteristics of different power systems neutral grounding techniques: Fact and fiction*. USA, Etalon 2018, pp.7-8.
6. *Правила устройства электроустановок*. 7-е изд. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004.
7. EY Renewable Energy Country Attractiveness Index (RECAI 60).
Disponibil: https://www.ey.com/en_gl/recai/
8. Definition of Criteria to Operate 20 kV Networks with Arc Suppression Coils According to *Standards EON aner AG - Germany*, (20th International Conference on Electricity Distribution, CIRED. Prague, 2009)
9. CALORIE, R., CERRETTI, A., GERI, A., LAURIA, S., MACCIONI, M., GATTA, FM. Abnormal Ground Fault Overvoltages in MV Networks, Analyses and Experimental Tests 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6–9 June 2011.
10. HAND, MARTIN, MCDONAGH, Neil (Ireland). Esb’s Adoption of Smart Neutral Treatments on Its 20 kV System. CIRED Workshop, Lyon, 7–8 June 2010.
11. FOLLIOT, P., BOYER, JM., BOLLE, S. *Neutral Grounding Reactor for Medium Voltage Networks*. Alstom report.
Disponibil: http://www.cired.net/publications/cired2001/1_5.pdf
12. ZAMORA, I., MAZON, A. J., ANTEPARA, F., PUHRINGER, M., SAENZ, J.R. *Experiences of Neutral Resonant System Implantation in Gorliz Substation*. 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona. 12–15 May 2003.
13. LOURO, M., CUNHA ABREU, J., DUARTE, F., MARTINS, M., FITEIRO, R., VALE, F. Effects on the Quality of Service of Changing the Neutral Grounding of MV Networks. 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt. 6–9 June 2011.

14. ВАЙНШТЕЙН, Р.А., КОЛОМИЕЦ, Н.В., ШЕСТАКОВА, В.В. *Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие*. Томск: Изд-во ТПУ, 2006.– 118с.
15. НАЗАРОВ, В.В. Нейтраль распределительных сетей 6–35 кВ. Какое заземление необходимо? В: *Новости ЭлектроТехники*. 2013. № 5(83).
Disponibil: <http://www.news.elteh.ru/arh/2013/83/07.php>
16. KULIKOV, A. L., OSOKIN, V.L., PAPKOV, B.V. The problems and peculiarities of distributed electricity. In: *Bulletin NGIEI*. 2018. № 11 (90), pp. 123–136. ISSN 2227-9407.
17. INAȚOC, ANDREEA-GEORGIANA. *Controlul și stabilitatea de tensiune în sistemele electroenergetice de distribuție active: rezumatul tz. de doct. în științe inginerești*. București, 2022. 15 p.
18. ВОРОПАЙ, Н.И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах. В: *Международная научно-практическая конференция «Малая энергетика-2005»*, Сб. докладов, Иркутск, 2005, с. 30–42.
19. KLIMOV, P.L. The effect of wind power plant distributed generation on distribution networks. In: *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017, vol. 21, no 2, pp. 97–105. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-97-105, vol. 21, no 2, pp. 97–105.
20. ГУСАРОВ, Л.А. Способы заземления нейтрали источников питания в сетях среднего напряжения, достоинства и недостатки, реальная практика применения в мире. В: *"Электрик Инфо"* онлайн журнал 2020 г.
Disponibil: <https://electric.info/article/1692>
21. EREMIA, Mircea. *Electric Power Systems. Volume I. Electric Networks*. București, 2006, pp.355-357.
22. SHIPP, David, ANGELINI, Frank. *Characteristics of different power systems neutral grounding techniques: Fact and fiction*. USA, Etalon 2018, pp.7-8.
23. KASSIM, Rasheed Hameed. Zig-zag grounding transformer modeling for zero-sequence impedance calculation using finite element method. In: *Diyala Journal of Engineering Sciences*. Vol. 08, No. 06, pp. 36-87, September 2015, pp.65-73.
24. МЛАДЗИЕВСКИЙ, Е. П., РЫЖКОВА, Е. Н. Сравнительный анализ аварийности распределительных сетей в условиях однофазного замыкания на землю. В: *Сборник трудов XVII международной научно-практической конференции*. Издательство: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019, pp. 55-61.
Disponibil: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42256785_80779092.pdf
25. GUȘĂ, Mircea. *Tehnica Tensiunilor Înalte*. Iași, 2020, pp.2-18.
26. Hotărâre Nr. 393 din 01-11-2019 privind aprobarea documentului normativ-tehnic în domeniul energiei NE1-01:2019 „Norme de exploatare a instalațiilor electrice ale consumatorilor noncasnici”. În: *Monitorul Oficial*, 31-01-2020, nr. 24-34, art. 90.

LISTA PUBLICAȚIILOR ȘTIINȚIFICE LA TEMA TEZEI

Articole în reviste științifice

1. **DOBREA, I.** The influence of the treatment mode of the neutral in the 6-35 kV networks on the displacement voltage in the quasi-stationary regime. In: *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering ser.*, 2019, nr. 1(43), pp. 128-133. ISSN 1842-4805.
2. MURDID, E., JINGAN, B., **DOBREA, I.** Influence of Synchronized Measurement Errors on the Results of Identification of the Transmission Line Parameters. In: *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering ser.*, 2020, N. 44, Iss. 1, pp. 14-19. ISSN 1842-4805.

Articole în lucrările conferințelor

3. STRATAN, I., PROȚUC, I., **DOBREA, I.** Contributions to the rational method of neutral earthing with MALLAB+SIMULINK. *Analele universității din Craiova, Seria: inginerie electrică*, nr.31, 2007, Vol. II, *6th International Conference of Electromechanical and Power Sistem – SIELMEN 2007*.
4. **DOBREA, I.**, POGORA, V., MACOVEI, I. Analiza supratensiunilor la punerea unei faze la pământ în rețeaua 10 kV adiacentă stației electrice „Centrala” 110/10 kV, or. Bălți. *Seria: inginerie electrică*, anul 2013, *9th International Conference of Electromechanical and Power Sistem – SIELMEN 2013*.
5. **DOBREA, Ina**, CORNOVAN, Irina. Analysis of the Actual Situation Regarding the Methods of Processing the Neutral in the 6-35 kV Networks. In: *SIELMEN 2017: Proceedings of the 11-th international conference on electromechanical and power systems*, 11-13 octombrie, 2017. Chișinău, 2017, pp. 619-622. ISBN 978-1-5386-1846-2.
6. **DOBREA, I.** The Opportunity to Treat the Neutral Through the Resistor or Combined Compensation Coil – Resistor. *Proceedings of the 12th International Conference on Electromechanical and Energy Systems*. SIELMEN 2019, October 9-11, 2019, Craiova-Chișinău, Electronic ISBN: 978-1-7281-4011-7, USB ISBN: 978-1-7281-4010-0. DOI:10.1109/SIELMEN.2019.8905891.
7. БОШНЯГА, В., СУСЛОВ, В., СТРАТАН, И., **ДОБРЯ, И.** Особенности работы кабельной распределительной сети 6-35 кВ в установившемся режиме с изолированной и компенсированной нейтралью при однофазном замыкании на землю. In: *Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы: сб. докл. II Междунар. науч. конф. (Минск, 3–6 окт.2022 г.) / под ред. Т. Г. Зориной. – Минск : Беларус. наука, 2023. – 461 с. ISBN 978-985-08-2994-8*.
8. BOSNEAGA, V., SUSLOV, V., STRATAN, I., **DOBREA, I.** The peculiarities of the steady state modes of medium voltage cables grid at various neutral grounding and single-phase to ground failure. In: *2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*. Iași, 20-22 October 2022. Electronic ISBN:978-1-6654-8994-2, USB ISBN:978-1-6654-8993-5. Electronic ISSN: 2644-223X.
9. BOSNEAGA, V., SUSLOV, V., STRATAN, I., **DOBREA, I.** The Peculiarities of Steady State Condition of Medium Voltage Cable Line 10 kV in Partial Compensation Mode of Neutral Grounding at Single-phase to Ground Fault. *2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/

MPS58874.2023.10187482. Electronic ISBN:979-8-3503-2682-6.

10. BOSNEAGA, V., SUSLOV, V., STRATAN, I., **DOBREA, I.** Steady State Condition of Cable Line 10 kV at Single-Phase to Ground Fault with Resistive Neutral Earthing. 2023 *International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Craiova, Romania, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIELMEN59038.2023.10290827. Electronic ISBN:979-8-3503-1524-0, Print on Demand(PoD) ISBN:979-8-3503-1525-7.
11. **DOBREA, I.** Calculul curenților de punere la pământ în rețeaua 10 kV a stației electrice “Horești”. *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*, Chișinău 2005.
12. **DOBREA, I.** Studiul supratensiunilor în rețelele cu neutrul izolat cu utilizarea aplicației SIMULINK. *Conferința Jubiliară Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților consacrată celei de-a 40-a Aniversări a Doctoranturii U.T.M.*, 17-18 noiem. 2006, Chișinău. Vol. 1: Radioelectronică și Telecomunicații. Calculatoare, Informatică și Microelectronică. Energetică / Univ. Tehn. a Moldovei. – Chișinău: U.T.M., 2006. – 477 p. ISBN 978-9975-45-024-9. ISBN 978-9975-45-025-6 (vol. 1).
13. **DOBREA, I.** Utilizarea combinată a bobinei de stingere și a rezistorului de legare la pământ pentru tratarea neutrului în rețelele de medie tensiune în sistemul electroenergetic al RM. *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*, 15-17 noiem. 2008, Chișinău. Vol. 1. Univ. Tehn. a Moldovei. Chișinău : U.T.M., 2008. 420 p. ISBN 978-9975-45-065-2. – ISBN 978-9975-45-114-7 (vol. 1).
14. **DOBREA, I.** Studiul metodelor de reglare automată a bobinelor de stingere. In: *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei*, 8 – 10 decembrie, 2011. Chișinău, 2012, vol. 1, pp. 238-239. ISBN 978-9975-45-208-3 (Vol.1).
15. **DOBREA, I.** Tratarea neutrului în rețelele de medie tensiune. Universitatea Tehnică a Moldovei, *Conferința Jubiliară Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților consacrată celei de-a 50-a Aniversări a U.T.M.*, 20 – 21 octombrie : Univ. Tehn. a Moldovei. Tehnica-UTM, 2014. ISBN 978-9975-45-249-6.
16. **DOBREA, I.** Analiza situației actuale privind modalitățile de tratare a neutrului în rețelele 6 – 35 kV. In: *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei*, 1-14 decembrie, 2016. Chișinău, 2017, vol. 1, pp. 379-382. ISBN 978-9975-45-500-8. ISBN 978-9975-45-501-5 (Vol.1).

Articole în culegeri naționale:

17. БОШНЯГА, В, СУСЛОВ, В., СТРАТАН, И, **ДОБРЯ, И.** Особенности работы кабельной распределительной сети 6-35 кВ в установившемся режиме однофазного замыкания на землю с перекомпенсацией тока повреждения. В: *Securitatea energetică și linii electrice dirijate. Volumul nr.13(28)*. Institutul de Energetică. Chișinău: S.n. 2022. Culegere de lucrări. ISBN 978-9975-158-68-8.
18. **DOBREA, I.**, ROTARU, A., STRATAN, I. Opportunity of using a mixed neutral treatment solution in the distribution electrical networks of the Republic of Moldova. In: *Journal of Engineering Science 2023*, 30 (3), pp. 60-77. ISSN 2587-3474, eISSN 2587-3482.

ADNOTARE

Autor – DOBREA Ina. **Titlul** – *Îmbunătățirea regimului de funcționare a rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV prin alegerea modului de tratare a neutrului*. Teză de doctor în vederea conferirii titlului științific de doctor în științe inginerești la specialitatea 221.01. *Sisteme și tehnologii energetice*. Chișinău 2023.

Structura lucrării: Lucrarea conține o introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 106 titluri și include 4 anexe, 157 pagini, 122 figuri, 12 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 18 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: sistem electroenergetic, rețele electrice de distribuție, regimul de tratare a neutrului, defect monofazat, supratensiuni, deplasarea neutrului, model matematic.

Domeniul de studiu: științe inginerești.

Scopul tezei: analiza potențialului de implementare a tratării neutrului rezistiv și combinat în rețelele electrice de distribuție din Republica Moldova și identificarea unui set de măsuri/acțiuni în vederea îmbunătățirii modurilor existente de tratare, precum și realizarea unor studii de caz prin modelarea regimurilor de funcționare a rețelelor electrice cu diferite moduri de tratare a neutrului.

Obiectivele tezei: realizarea unui studiu bibliografic privind stadiul actual a problemei pe plan mondial și în Republica Moldova; analiza comparativă a diferitelor moduri de tratare a neutrului; analiza regimului de defect monofazat în rețelele electrice de medie tensiune și identificarea criteriilor de bază privind alegerea soluției optime; modelarea și simularea regimurilor normale și de defect monofazat metalic sau prin arc electric; aplicarea rezultatelor obținute pentru elaborarea setului de măsuri/recomandări aplicabile în condițiile RM.

Noutatea și originalitatea științifică a tezei. Elaborarea modelelor matematice de calcul ai parametrilor de regim pentru diferite modalități de tratare a neutrului rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV, ceea ce permite modelarea matematică a acestor regimuri, identificarea celui optimal evitând încercările experimentale, limitate de uzura avansată a echipamentelor din cadrul rețelelor electrice.

Rezultatul obținut în baza modelelor matematice obținute sunt elaborate recomandări/propuneri practice privind implementarea modalităților noi de tratare (prin rezistență și combinată) a neutrului rețelelor electrice de distribuție din Republica Moldova.

Semnificația teoretică. Teza aduce contribuții științifico-practice la calculul și analiza regimurilor de funcționare a rețelelor electrice de distribuție 6-35 kV cu diferite modalități de tratare a neutrului în scopul identificării modalității de tratare a neutrului ce asigură îmbunătățirea calității serviciului de distribuție a energiei electrice și fiabilității funcționării acestora.

Valoarea aplicativă a lucrării. În lucrare s-au elaborat modelele matematice a patru regimuri de tratare a neutrului, au fost obținute expresiile analitice ale parametrilor de regim. Regimurile analizate au fost modelate și simulate, ceea ce a demonstrat corectitudinea modelelor obținute.

Implementarea rezultatelor științifice. 1. Implementarea rezultatelor cercetărilor la stațiile electrice „Centrala” 110/10 kV, „Bălți-330 kV” 330/110/10 kV și „CET-Nord” 110/10 kV, RED-Nord. 2. La Departamentul Energetica a fost elaborat un stand modern de laborator „Analiza metodelor de tratare a neutrului în rețelele 6-35 kV”. 3. Rezultatele obținute sunt utilizate în cursurile Transportul și Distribuția Energiei Electrice (TDEE -titularul disciplinei prof. univ. dr., Ion SRTATAN) și Partea Electrică a Centralelor și Stațiilor (PECS -titularul disciplinei lect. univ. Ina Dobrea).

АННОТАЦИЯ

Автор – Добрая Ина. **Название** – *Улучшение режимов работы распределительных электрических сетей 6-35 кВ посредством выбора метода заземления нейтрали.*

Диссертация о присвоение докторской степени в области технических наук, специальность 221.01. *Энергетические системы и технологии.* Кишинэу 2023.

Структура работы: работа состоит из введения, четырех глав, выводов и рекомендаций, библиографии из 106 наименований и включает 4 приложений, 157 страниц, 122 рисунков и 12 таблиц. Результаты исследования опубликованы в 18 научных работах.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, распределительные электрические сети, режим заземления нейтрали, однофазное замыкание, перенапряжения, смещение нейтрали, математическая модель.

Область исследования: инженерная наука.

Цель диссертации анализ потенциала внедрения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в распределительных электрических сетях Республики Молдова и выявление комплекса мероприятий/рекомендаций с целью улучшения существующих методов заземления нейтрали а также проведение исследований с моделированием режимов работы электросетей с различными способами заземления нейтрали.

Задачи диссертации: библиографическое исследование текущего состояния проблемы на мировом уровне и в Республике Молдова; сравнительный анализ различных способов заземления нейтрали; анализ однофазных замыканий на землю в сетях среднего напряжения и выявление основных критериев выбора оптимального решения; моделирование нормальных и однофазных замыканий на землю металлических или дуговых; применение полученных результатов для разработки мероприятий и рекомендаций, применимых в условиях Республики Молдова

Научная новизна работы: Разработка математических моделей расчета режимных параметров при различных способах заземления нейтрали в распределительных электрических сетях 6-35 кВ, позволяющие проводить математическое моделирование этих режимов, выявление оптимального режима не прибегая к экспериментальным испытаниям, ограниченных высоким износом оборудования в электрических сетях.

Решенная научная проблема: на основе полученных математических моделей разработаны практические рекомендации/предложения по внедрению новых способов заземления нейтрали (резистивное и комбинированное) в распределительных электрических сетях Республики Молдова.

Теоретическая значимость. Диссертация вносит научно-практический вклад в расчет и анализ режимов заземления нейтрали электрических сетей среднего напряжения с целью повышения эффективности распределительных электрических сетей, качества услуг по распределению электроэнергии и надежности их эксплуатации.

Прикладное значение работы: разработаны математические модели четырех режимов заземления нейтрали, получены аналитические выражения параметров режимов. Анализируемые режимы были смоделированы и симулированы, что доказало корректность полученных моделей.

Внедрение научных результатов: 1. Внедрение результатов исследований на электростанциях «Centrala» 110/10 кВ, «Bălți -330 кВ», 330/110/10 кВ и «СЕТ-Nord» 110/10 кВ, RED-Nord. 2. В департаменте Энергетика разработан современный лабораторный стенд «Анализ методов заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ». 3. Полученные результаты используются в курсах «Передача и распределение электрической энергии» (ТДЕЕ – проф., д.т.н. Ион СРТАТАН) и «Электрическая часть электростанций и подстанций» (РЕС – лект. Ина Добрая).

ANNOTATION

Author – DOBREA Ina. **Title** – *Improving the operation of 6-35 kV distribution electric networks by choosing the neutral treatment mode*. PhD thesis for the awarding of the scientific title of doctor of technical sciences, specialty 221.01. *Energy systems and technologies*. Chişinău 2023.

Structure: The paper consists of an introduction, four chapters, conclusions and recommendations, 106 bibliography titles, and includes 4 Annexes, 157 pages, 122 figures, 12 tables. The results are published in 18 scientific papers.

Keywords: electrical distribution networks, neutral treatment regime, single-phase fault, overvoltages, displacement of the neutral, mathematical model.

Field of study: engineering sciences.

The aim of the thesis: analyzing the potential for implementing resistive and combined neutral treatment in the distribution electrical networks in the Republic of Moldova and identifying a set of measures/actions to improve existing treatment methods, as well as conducting case studies by modeling the operating modes of electrical networks with different neutral treatment methods.

Paper Objectives: conducting a bibliographic study on the current status of the issue worldwide and in the Republic of Moldova; conducting a comparative analysis of various neutral treatment methods; analyzing the single-phase fault regime in medium-voltage electrical networks and identifying basic criteria for choosing the optimal solution; modeling and simulating normal and single-phase metallic or arc electrical fault regimes; applying the obtained results to develop a set of applicable measures/recommendations in the context of the Republic of Moldova.

Scientific novelty and originality of the work. Developing mathematical models for calculating the operating parameters for different methods of neutral treatment in 6-35 kV distribution electrical networks, allowing for mathematical modeling of these regimes, and identifying the optimal one while avoiding experimental trials limited by the advanced wear and tear of equipment within the electrical networks.

Important scientific problem solved based on the mathematical models obtained, practical recommendations/proposals have been developed for the implementation of new methods of neutral treatment (through resistance and combined) in the distribution electrical networks of the Republic of Moldova.

Theoretical importance. The thesis contributes scientific and practical insights to the calculation and analysis of operating modes in 6-35 kV distribution electrical networks with various neutral treatment methods to identify the method of neutral treatment that ensures improved quality of electric power distribution service and reliability of their operation.

The practical value of the work. In the paper, mathematical models for four neutral treatment regimes were developed, and analytical expressions for the operating parameters were obtained. The analyzed regimes were modeled and simulated, demonstrating the correctness of the obtained models.

Implementation of research results. Research results: 1. Implementation of the research results at the power stations "Centrala" 110/10 kV, "Bălţi-330 kV" 330/110/10 kV and "CET-Nord" 110/10 kV, RED-Nord. 2. A modern laboratory stand "Analysis of neutral treatment methods in 6-35 kV networks" was developed at the Energy Department. 3. The obtained results are used in the courses Transport and Distribution of Electric Energy (TDEE - subject holder, university professor, Ion SRTATAN) and Electrical Part of Power Plants and Stations (PECS - subject holder, university lecturer Ina Dobrea).

DOBREA INA

**ÎMBUNĂTĂȚIREA REGIMULUI DE FUNCȚIONARE A REȚELELOR
ELECTRICE DE DISTRIBUȚIE PRIN ALEGEREA MODULUI DE
TRATARE A NEUTRULUI**

221.01 „SISTEME SI TEHNOLOGII ENERGETICE”

Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești

Aprobat spre tipar: 17.11.23

Hârtie ofset. Tipar RISO

Coli de tipar: 2,0

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Tiraj 50 ex.

Comanda nr.

U MD-2004, mun. Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, nr. 168, UTM
MD-2045, mun. Chișinău, str. Studenților 9/9, Editura „Tehnica-UTM”.

© U.T.M., 2023