

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ**

Cu titlu de manuscris
C.Z.U:621.316.925.1

TURTURICA NATALIA

**ELABORAREA METODEI DE CALCUL A DETERIORĂRILOR
COMPLEXE PE LINIILE ELECTRICE CU
AUTOCOMPENSARE ȘI CREAREA FILTRELOR
COMPONENTELOR SIMETRICE HEXAFAZATE**

221.01. SISTEME ȘI TEHOLOGII ENERGETICE

Rezumatul tezei de doctor în științe ingineresti

CHIȘINĂU, 2023

Teza a fost elaborată în laboratorul Echipament electroenergetic și electronică de putere a Institutului de Energetică a Universității Tehnice a Moldovei

Conducător științific:

Chiorsac Mihail, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar

Referenți oficiali:

Erhan Fiodor, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar

Stratan Ion, doctor în științe tehnice, profesor universitar

Componența consiliului științific specializat:

Oleșciuk Valentin, doctor habilitat în științe tehnice, președinte

Comendant Ion, doctor în științe tehnice, secretar științific

Arion Valentin, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar

Boșneaga Valeriu, doctor în științe tehnice

Hlusov Viorica, doctor în științe tehnice, conferențiar universitar

Susținerea tezei va avea loc la 24 octombrie 2023, ora 14⁰⁰, în ședința Consiliului științific specializat D 221.01-23-3 al Institutului de Energetică a Universității Tehnice a Moldovei: MD-2028, Republica Moldova, mun. Chișinău, str. Academiei, 5, bir. 434.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Tehnico-Științifică a Universității Tehnice a Moldovei și la pagina web a ANACEC (www.cnaa.md).

Rezumatul a fost expediat la _____ 2023.

Secretar științific al
Consiliului științific specializat,
Comendant Ion, doctor în științe tehnice

Conducător științific,
Chiorsac Mihail, doctor habilitat în științe tehnice,
profesor universitar

Autor:
Turturica Natalia

© Turturica Natalia, 2023

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitate și relevanță

Starea actuală a dezvoltării energeticii necesită integrarea în continuare a sistemelor energetice, majorarea capacității de transport a liniilor electrice, reglarea fluxului de puteri active și reactive transmise și implementarea de noi echipamente de automatizare și protecție prin relee. Unul dintre elementele principale ale sistemelor energetice sunt liniile de transport a energiei electrice, cărora li se atribuie nu numai funcția de a transmite a energiei electrice, ci și de reglare a fluxurilor de putere transmisă. Acest fapt este de o importanță deosebită pentru liniile electrice de interconexiune dintre sistemele electroenergetice.

Majorarea capacității de transmitere a energiei electrice prin majorarea tensiunii, din punct de vedere tehnico-economic este deja epuizată.

Actualmente, cea mai rezonabilă cale de majorare a capacității de transmitere a liniilor electrice de înaltă tensiune o constituie reducerea impedanței de undă. Pentru a reduce impedanța de undă și a majora capacitatea de transmitere a liniilor electrice în dependență de regimul de funcționare a sistemului electroenergetic au fost propuse așa numitele linii compacte, linii electrice cu autocompensare (LEAC) cu impedanța de undă redusă în baza liniilor cu lanț dublu și apropierea diferitor faze ale circuitelor duble între ele și a liniilor electrice cu autocompensare reglabilă (LEACR) - cu impedanță de undă reglabilă prin reglarea unghiului dintre tensiunile fazelor apropiate ale diferitelor circuite ale LEAC cu lanț dublu.

Studierea diferitor moduri de funcționare și implementarea LEAC și LEACR necesită soluționarea unui șir de probleme, inclusiv a protecției prin relee, soluționarea căreia se bazează pe calcule diferitor scurtcircuite ce pot avea loc pe LEAC și LEACR.

Investigațiile efectuate până în prezent au fost consacrate scurtcircuitelor simetrice și nesimetrice simple, ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, și nu cuprind studierea și calcularea deteriorărilor complexe: scurtcircuite nesimetrice cu rupturi de faze într-un loc, sau locuri diferite, necesare pentru implementarea LEAC și LEACR.

Studierea diferitor deteriorări complexe, calcularea valorilor electrice în cazul întreruperilor și scurtcircuitelor pe LEAC și LEACR pentru crearea protecției prin relee, necesită elaborarea unei noi metode de calcul cu luarea în considerație a particularităților LEAC și LEACR față de liniile electrice obișnuite cu lanț dublu: influența electromagnetică sporită dintre fazele apropiate, ce depinde de unghiului dintre tensiunile fazelor apropiate ale diferitelor circuite ale LEAC și LEACR. Soluționării acestor probleme și este consacrată teza prezentă: elaborarea metodei de calcul a deteriorărilor complexe pe liniile electrice cu autocompensare și crearea filtrelor componentelor simetrice hexafazate

Scopul și obiectivele cercetării. Scopul prezentei lucrări este: elaborarea bazei teoretice, a metodologiei și metodelor de calcul a unor deteriorări complexe - scurtcircuite și întreruperi de fază pe LEA (LEACR) și crearea în baza metodologiei propuse a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, necesare pentru elaborarea unei protecții prin relee eficientă, sensibilă și vabilă a LEA și LEACR.

Obiectul cercetării sunt liniile electrice cu autocompensare (LEAC) și liniile electrice cu autocompensare reglabilă (LEACR).

Pentru realizarea scopului dat se formulează următoarele **obiective de cercetare**:

1. Elaborarea bazei fundamentale ale metodologiei de calcul pentru deteriorări complexe : scurtcircuite nesimetrice cu rupturi de faze într-n loc, sau locuri diferite de scurtcircuite asimetrice și întreruperi de fază prin metoda a șase componente simetrice, crearea filtrelor hexafazate ca parte componentă a elaborării ulterioare a protecției eficiente prin relee a LEAC și LEACR.
2. Elaborarea unei metode de calcul adecvate și corecte a curentului și tensiunii în cazul unor deteriorări complexe ale LEAC și LEACR, ținând cont de particularitățile de funcționare ale acestora la orice unghi de deplasare între vectorii tensiunilor aplicate dintre fazele apropiate.
3. Aprobarea și aplicarea metodologiei de calcul elaborate a deteriorărilor compuse ce pot avea loc pe LEAC și LEACR concrete.
4. Crearea filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru elaborarea protecției prin relee a LEAC și LEACR.

Ipoteza cercetării. Se preconizează, că elaborarea metodologiei și metodei propuse va completa teoria de calcul a scurtcircuitelor nesimetrice pe LEA hexafazate, care includ LEAC și LEACR și LEA cu lanț dublu. Ea va permite crearea unei metode corecte, eficiente și relativ simplă și aplicabilă în practica ingineriei, pentru calcularea scurtcircuitelor nesimetrice ce pot avea loc în orice circuit hexafazat, inclusive LEAC și LEACR. De asemenea, se presupune de-a elabora în baza metodei propuse filtrele de depistare a componentelor simetrice hexafazate, necesare pentru crearea unei protecții eficiente pentru LEAC și LEACR.

Metode de cercetare: analiza literaturii științifice și metodologice, aplicarea teoriei clasice a desfășurării unui sistem nesimetric în componente simetrice Fourier, studierea cercetărilor efectuate, sistematizarea rezultatelor obținute anterior asupra problemei de cercetare. Compararea abordărilor existente pentru rezolvarea problemei, metodele aplicării matricelor matematice de cercetare și analiză, metode de simulare la calculator a LEAC

(LEACR), bazate pe schemele complexe elaborate, metoda matematică de calcul a deteriorărilor complexe folosind metoda celor șase componente simetrice, încercări experimentale prin modelare la calculator, utilizând aplicații-soft Multisim și Matlab Simulink.

Noutatea științifică a cercetării. Noutatea științifică a lucrării prezentate constă în elaborarea unei metodologii și metode noi de calcul a valorilor electrice (curent și tensiune) la diverse deteriorări complexe (scurtcircuite): scurtcircuite simultane în diferite segmente a LEA, scurtcircuit și întreruperi de fază, scurtcircuit și întreruperi de fază în diferite locuri a liniilor electrice, ce pot avea loc pe LEA cu șase faze, în special pe LEAC și LEACR.

Elaborarea schemelor echivalente complexe pentru simularea la calculator în mediul programelor Matlab-Simulink a diferitor tipuri de deteriorări complexe.

Elaborarea schemelor electrice și metodei de modelare la calculator în Matlab-Simulink a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, pentru crearea unei protecții prin relee modern și eficientă, bazată pe utilizarea microprocesoarelor, cu reacție sensibilă la depistarea componentelor simetrice hexafazate ce apar la diferite deteriorări complexe pe LEAC și LEACR.

Problema științifică importantă rezolvată în lucrare: elaborarea bazei teoretice și metodei practice de calcul a a diferitor tipuri de deteriorări complexe ce pot avea loc într-un sistem hexafazat, inclusiv pe LEAC și LEACR și a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, ce permit elaborarea unei protecții prin relee eficiente, necesare implementării LEAC și LEACR.

Relevanța teoretică a studiului. Rezultatele obținute în lucrare constituie un nou aport în teoria de calcul a scurtcircuitelor nesimetrice într-un circuit electric hexafazat. În baza metodei componentelor simetrice hexafazate s-au elaborat bazele teoretice, metodologia de calcul și modelare la calculator a diferitor tipuri de deteriorări complexe: scurtcircuite nesimetrice cu simultane rupturi de fază în circuite electrice și sisteme hexafazate de transport a energiei electrice, inclusiv LEAC și LEACR. Crearea unor premise teoretice pentru elaborarea filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecția prin relee a LEAC și LEACR.

Relevanța practică a rezultatelor lucrării. A fost creată o metodă de calcul universală, relativ ilustrativă și aplicabilă în practica ingineriei la determinarea deteriorărilor complexe: scurtcircuite și întreruperi pe LEAC, LEACR și elaborate schemele principale ale filtrelor componentelor simetrice hexafazate, necesare elaborării protecției prin relee la implementarea LEAC și LEACR. Metoda de calcul pentru calculul defecțiunilor complexe pe LEAC (LEACR) propusă în teză de doctorat, poate fi aplicată la calcularea deteriorărilor nesimetrice în orice

sisteme hexafazate de transport a energiei electrice, inclusiv și pe liniile electrice obișnuite cu dublu circuit, considerându-le ca linii hexafazate, ceea ce simplifică semnificativ calculul.

Autenticitatea și justificarea rezultatelor lucrării sunt asigurate de utilizarea metodologiei de cercetare, de scopurile și obiectivele corecte ale lucrării, de reprezentativitatea datelor experimentale, de corectitudinea prelucrării acestora și de calcule comparabile ale unor tipuri de deteriorări complexe pentru LEA obișnuite cu dublu circuit prin metoda cunoscută a celor trei componente simetrice și metoda celor șase componente simetrice. Compararea și coecidența calculelor efectuate și prin modelarea lor la calculator a unor deteriorări complexe pe LEAC și LEACR după metodologia propusă.

Aprobarea rezultatelor lucrării: Principalele noțiuni și rezultatele investigațiilor prezentate în teză au fost raportate și discutate la:

- 1) Conferinței Științifice Internaționale a Doctoranzilor: Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători, Chișinău, 2015;
- 2) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2015, Chișinău, 2015;
- 3) International Conference: Energy of Moldova - 2016. Regional aspects of development”, Chișinău, 2016;
- 4) Conferinței Științifice a Doctoranzilor Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători Ediția a V-a Chișinău, 2016;
- 5) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2017, Chișinău, 2017;
- 6) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2019, Chișinău, 2019.
- 7) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2021, Chișinău, 2021;
- 8) XI международная научная конференция, Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности, Казань, 2021.

Pe tema tezei au fost publicate 11 articole, 2 rezumate și au fost prezentate 8 rapoarte la 8 conferințe internaționale.

Principalele poziții pentru susținere:

1. Metodologia de calcul a deteriorărilor complexe pe liniile electrice hexafazate LEAC și LEAR în baza componentelor simetrice hexafazate;

2. Principiul elaborării schemelor echivalente în coordonatele componentelor simetrice 0,1,2,3,4,5 pentru calcularea deteriorărilor complexe pe LEAC și LEACR prin metoda componentelor simetrice hexafazate și simularea acestora la calculator prin aplicația-soft Multisim și Matlab-Simulink. Metodologia elaborării și modelării filtrelor componentelor simetrice hexafazate în mediul Matlab-Simulink.

Structura și volumul tezei de doctorat. Teza conține introducerea, patru capitole, concluzii, încheiere, bibliografie care conține 172 de surse, 143 de pagini a textului de bază, 8 tabele și 65 de figuri.

Cuvinte cheie: linii electrice cu autocompensare (LEAC), linii electrice cu autocompensare reglabilă (LEACR), calculul scurtcircuitelor nesimetrice complexe, metoda componentelor simetrice hexafazate, filtrele componentelor simetrice hexafazate, modelarea (simularea) în aplicații-soft.

CONTINUTUL DE BAZĂ AL LUCRĂRII

În introducere se fundamentează relevanța temei, se indică obiectul cercetării și se formulează scopul și obiectivele de cercetare. Este formulată baza teoretică și metodologică a lucrării, concretizată metodologia de cercetare, prezentată noutatea științifică și valoarea teoretică și practică a cercetării.

Primul capitol "ANALIZA METODELOR EXISTENTE PENTRU CALCULUL DETERIORĂRIILOR SIMPLE ȘI COMPLEXE PE LEA OBIȘNUITĂ ȘI LEA CU AUTOCOMPENSARE", oferă o analiză a metodelor existente de calcul a scurtcircuitelor nesimetrice pe liniile electrice trifazate, inclusiv și cele cu lanț dublu și a metodei elaborate prin utilizarea componentelor simetrice hexafazate pentru calcularea și analiza diferitor deteriorări complexe ce pot avea loc pe LEAC și LEACR.

Se demonstrează faptul, că ținând cont de specificul și caracteristicile LEAC și LEACR, cea mai optimă metodă de calculare a deteriorărilor nesimetrice, inclusiv celor complexe pe LEAC, LEACR: scurtcircuite nesimetrice cu simultane rupturi de fază într-un singur loc sau în locuri diferite etc., este metoda propusă a componentelor simetrice hexafazate.

Considerând LEAC și LEACR ca linii electrice hexafazate cu secvențele fazelor A, B, C, D, E, F și ținând cont de caracteristicile acestora, sistemele vectorilor nesimetrici ai curenților (tensiunilor) fazelor, respectiv pot fi descompuse în șase sisteme vectoriale de componente simetrice. Matricile de trecere de la componentele simetrice hexafazate ale curenților (tensiunilor) la curenții (tensiunile) de fază pentru LEAC și LEACR depind de secvența fazelor apropiate.

Fig. 1 reprezintă componentele simetrice ale curenților (tensiunilor) nesimetrice în coordonatele a șase componente simetrice 0,1,2,3,4,5 corespunzătoare secvenței fazelor: A, C', B, A', C, B' și unghiul natural al diferenței de fază stabilit $\theta = 120^\circ$ dintre tensiunile fazelor apropiate pentru LEAC și pentru un unghi reglabil θ dintre sistemele de vectori a tensiunilor fazelor apropiate pentru LEACR, la reglarea acestuia în diapazonul de $-120^\circ \leq \theta \leq -240^\circ$.

Matricea de tranziție de la șase componente simetrice ale vectorilor tensiunii (curenților) 0,1,2,3,4,5 la coordonatele de fază AC', BA', CB' poate fi efectuată conform expresiei:

$$\dot{\vec{F}} = \dot{\vec{S}}_6 \times \dot{\vec{F}}_S, \quad (1)$$

$$\text{unde: } \dot{\vec{F}} = \begin{bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_{C'} \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_{A'} \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_{B'} \end{bmatrix}, \quad \dot{\vec{S}}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \end{bmatrix}, \quad \dot{\vec{F}}_S = \begin{bmatrix} \dot{F}_{A0} \\ \dot{F}_{A1} \\ \dot{F}_{A2} \\ \dot{F}_{A3} \\ \dot{F}_{A4} \\ \dot{F}_{A5} \end{bmatrix} -$$

reprezintă matricile: $\dot{\vec{F}}$ - matricea coloană a vectorilor de curent (tensiune) în coordonatele de fază; $\dot{\vec{S}}_6$ - matricea de transfer (trecere) de la componentele simetrice hexafaze 0,1,2,3,4,5 a vectorilor de curent (tensiune) ai LEA hexafaze la coordonatele de fază AC', BA', CB' și

$\dot{\vec{F}}_S$ - matricea coloană a vectorilor de curent (tensiune) în coordonatele a șase componente simetrice 0,1,2,3,4 și 5.

Matricea de tranziție inversă: de la componentele simetrice 0,1,2,3,4 și 5 la coordonatele de fază:

$$\dot{\vec{F}}_S = \dot{\vec{S}}_6^{-1} \times \dot{\vec{F}}, \quad (2)$$

$$\text{unde: } \dot{\vec{S}}_6^{-1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} \text{- matricea inversă de trecere de la} \\ \text{coordonatelor de fază la matricea} \\ \text{componentelor simetrice 0,1,2,3,4,5.} \end{array}$$

Parametrii pasivi ai sistemelor trifazate echivalente M și N , la care LEAC (LEACR) este conectată în coordonatele a trei componente simetrice:

$$[Z_{SM}]_{S_6} = \dot{\vec{S}}_{nU}^{-1} [Z_{SM}]_{S_3}^{pp} \dot{\vec{S}}_{ni}; \quad [Z_{SN}]_{S_6} = \dot{\vec{S}}_{nU}^{-1} [Z_{SN}]_{S_3}^{pp} \dot{\vec{S}}_{ni} \quad (3)$$

unde $[Z_{SM}]_{s_3}^{np}$, $[Z_{SN}]_{s_3}^{np}$ - matricea impedanțelor echivalente ale sistemelor trifazate de alimentare M și N în coordonatele de fază și în coordonatele a trei componente simetrice 0,1,2, ale sistemelor trifazate.

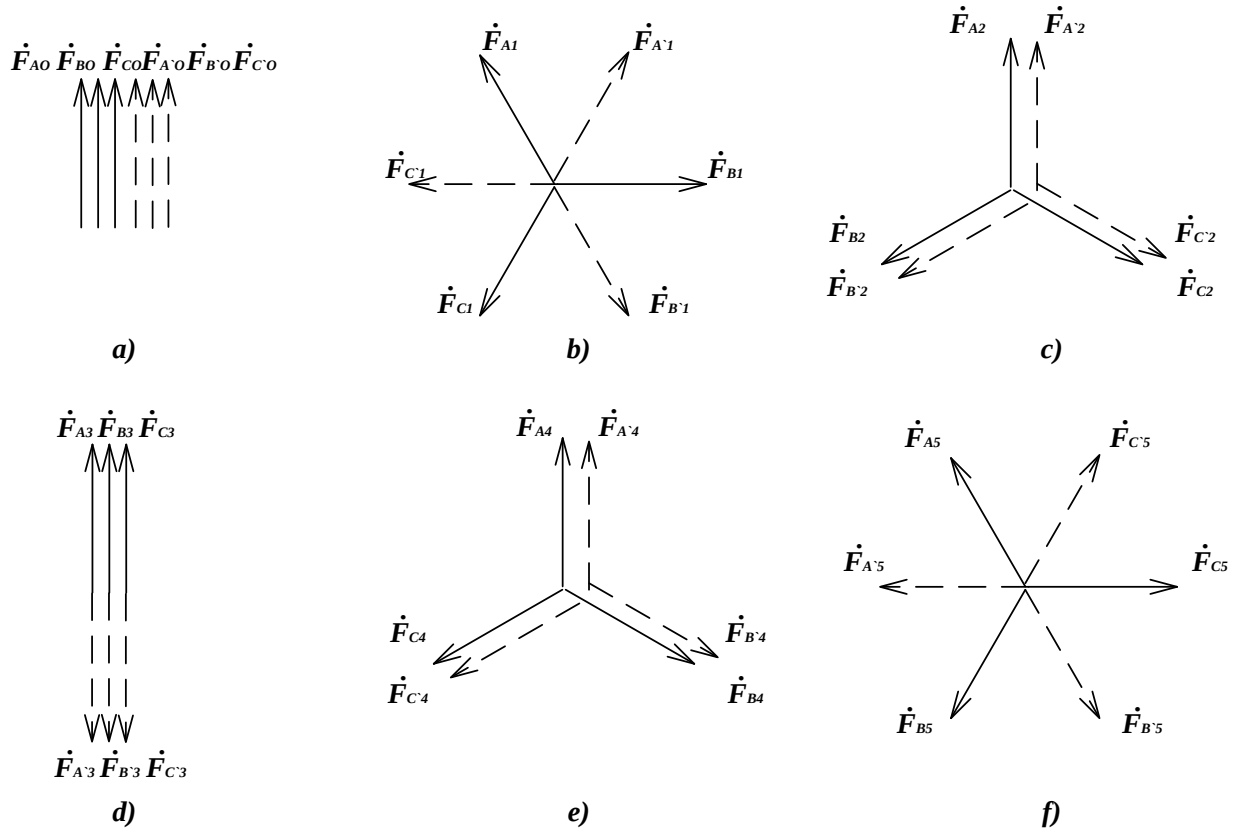


Fig. 1. Componentele simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 ale curenților (tensiunilor) sistemului nesimetric hexafazat AC', BA', CB' la reglarea unghiului θ în intervalul $-120^\circ \leq \theta \leq -240^\circ$:

a) de secvență „0”; b) de secvență „1”; c) de secvență „2”; d) de secvență „3”; e) de secvență „4”; f) de secvență „5”.

Metoda celor șase componente simetrice 0,1,2,3,4 și 5, aplicată la calcularea diferitor deteriorări complexe pe LEAC și LEACR, simplifică semnificativ calculul ținând cont de particularitățile acestora, deoarece permite diagonalizarea completă a matricei parametrilor pasivi ale LEAC și LEACR și efectuarea calculelor după schemele echivalente de substituie ale acestora în coordonatele componente simetrice 0,1,2,3,4 și 5, ce nu sunt legate între ele prin inductanță mutuală reciprocă:

$$\dot{Z} = \begin{vmatrix} \dot{Z}_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_5 \end{vmatrix} \quad (4)$$

unde: $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ – sunt impedanțele LEAC (LEACR) în coordonatele celor șase componente simetrice 0,1,2,3,4,5.

În al doilea capitol "ELABORAREA METODEI DE CALCUL A DIVERSELOR DETERIORĂRI COMPLEXE ÎN BAZĂ COMPONENTELOR SIMETRICE HEXAFAZATE", în baza metodei elaborate de descompunere a sistemului de vectori nesimetrice a curenților (tensiunilor) sistemului hexafazat în șase sisteme de componente simetrice 0,1,2,3,4,5 pentru calcularea unor tipuri simple de scurtcircuite asimetrice, este elaborată metoda de calculare a diferitor deteriorări complexe pe LEAC și LEACR, cum ar fi scurtcircuite nesimetrice simultane cu ruperi de fază în același loc sau în locuri diferite. Se examinează calculele următoarelor deteriorări complexe pe LEAC, LEACR:

- ruperea uneia sau mai multor faze;
- calculul unei rupturi dintre fazele LEACR cu un scurtcircuit nesimetric simultan al altor faze la pământ;
- calculul ruperii uneia dintre faze ale LEACR cu scurtcircuit simultan la pământ.

Folosind metoda suprapunerii, fiecare deteriorare complexă poate fi analizată, considerând ca fiind formată din două nesimetrii simple: un scurtcircuit și o rupere de fază. Formulele generalizate pentru condițiile de frontieră și calcularea diferitor scurtcircuit nesimetrice simple (defecțiuni transversale) pe LEAC (LEACR) au fost studiate anterior. Aplicând o abordare similară, în lucrare s-au obținut formulele generalizate pentru condițiile de frontieră în locul deteriorărilor complexe (defecțiuni longitudinale și transversale - ruperi de fază și scurtcircuite nesimetrice pe LEAC (LEACR)).

Conform secvenței fazelor LEAC (LEACR), folosind, pentru comoditate, următoarele denumiri (marcaje) ale fazelor: d, e, h, i, j, k în ordinea secvenței pozitive ale lor și a componentele simetrice ale curenților și tensiunilor cu cifrele 1, 2, 3, 4, 5, 6 putem obține condițiile de frontieră generalizate în coordonatele componentelor simetrice hexafazate pentru orice nesimetrie longitudinală (ruperi de fază):

$$\dot{I}_{(y)} = 0, \text{ unde } y = d, y = e, y = h, y = i, y = j, y = k \quad (5)$$

$\dot{U}_{(y)} = 0$, unde $y = 1 \dots 6; y \neq e, y \neq h, y \neq i, y \neq j, y \neq k$,

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y,p)} \dot{I}_{s(p)} &= 0 \\ \text{unde : } y &= d, y = e, y = h, y = i, y = j, y = k \\ \sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y,p)} \dot{U}_{s(p)} &= 0 \\ \text{unde : } y &= 1 \dots 6; y \neq e, y \neq h, y \neq i, y \neq j, y \neq k. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

În baza condițiilor la frontieră, sunt obținute ecuații generalizate pentru determinarea oricărei asimetrii longitudinale (rupturi de fază) pe LEAC (LEACR) cu orice număr de faze rupte:

$$\begin{aligned} \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(d,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; & \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(i,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(e,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; & \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(j,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(h,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; & \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(k,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

unde:

$p = d, p = e, p = h, p = i, p = j, p = k$;

$\dot{S}_{(d,y)}, \dot{S}_{(e,y)}, \dot{S}_{(h,y)}, \dot{S}_{(i,y)}, \dot{S}_{(j,y)}, \dot{S}_{(k,y)}$ - elementele respective ale matricei $\dot{S}_6$;

$\dot{E}_{s(y)}$ - elementul y al matricei-colonițe $\dot{E}_S$;

Z_{yy} - elementul y al matricei impedanței sumare $Z_{k\Sigma}$;

$\dot{S}_{(y,p)}^{-1}$ - elementul respectiv al matricei inverse $\dot{S}_6^{-1}$;

$\dot{U}_{s(p)}$ - tensiunea pe fazele deteriorate.

În urma calculării tensiunii în locul nesimetriei conform ecuației (7), se determină componentele simetrice ale tensiunilor și curenților în locul de rupere a fazelor, precum și valorile curenților fazelor deteriorate și nedeteriorate.

Astfel, calculul oricăror deteriorări complexe asociate cu rupturile de fază se reduce la rezolvarea sistemelor generalizate de ecuații (7).

Calcularea oricăror deteriorări asociate de scurtcircuite nesimetrice simple poate fi efectuat, folosind sisteme de ecuații generalizate obținute anterior, similare cu ecuațiile (7).

Pe baza acestor sisteme de ecuații, au fost elaborate schemele echivalente complexe generalizate pentru calcularea asimetriilor longitudinale și transversale, prezentate în Fig. 2 a, b. În acestea, schemele echivalente a secvențelor 0,1,2,3,4,5, sunt prezentate sub aspect de bipoli cu clemele M și N.

Schemele sunt conectate reciproc între ele conform condițiilor de frontieră ale deteriorării date în coordonatele componentelor simetrice hexafazate, folosind transformatoare ideale intermediare. Coeficienții de transformare ale transformatoarelor intermediare ideale ($\dot{k}_{T0}$, $\dot{k}_{T1}$, $\dot{k}_{T2}$, $\dot{k}_{T3}$, $\dot{k}_{T4}$, $\dot{k}_{T5}$) se selectează conform tabelului 1, în dependență de faza de referință, care este considerată deosebită.

Tabelul 1. Coeficienții de transformare a transformatoarelor intermediare ideale

Faza de referință	$\dot{k}_{T0}$	$\dot{k}_{T1}$	$\dot{k}_{T2}$	$\dot{k}_{T3}$	$\dot{k}_{T4}$	$\dot{k}_{T5}$
A	1	1	1	1	1	1
C'	1	-a	a ²	-1	a	-a ²
B	1	a ²	a	1	a ²	a
A'	1	-1	1	-1	1	-1
C	1	a	a ²	1	a	a ²
B'	1	-a ²	a	-1	a ²	-a

O schemă echivalentă complexă cu nesimetrie simultană în diferite locuri pe LEAC (LEACR) poate fi compilată prin combinarea schemelor de substituie complexe separate, compuse pentru unele nesimetrii simple: scurtcircuit cu ruptură defază într-un loc și în locuri diferite ce constituie deteriorarea complexă data în conformitate cu condițiile de frontieră generalizate ale acestei nesimetrii complexe. În acest caz, este necesar să se țină cont în schemele echivalente de conexiunea electrică dintre schemele secvențelor 0,1,2,3,4 și 5 pentru un loc de nesimetrie, cu condiția că în alt loc de nesimetrie schemele secvențelor 0,1,2,3,4 și 5 sunt racordate prin transformatoare intermediare ideale. Spre exemplu, o schemă complexă pentru întreruperea fazei A și scurtcircuitarea simultană a fazei C' a LEAC la pământ este prezentată în fig. 3.

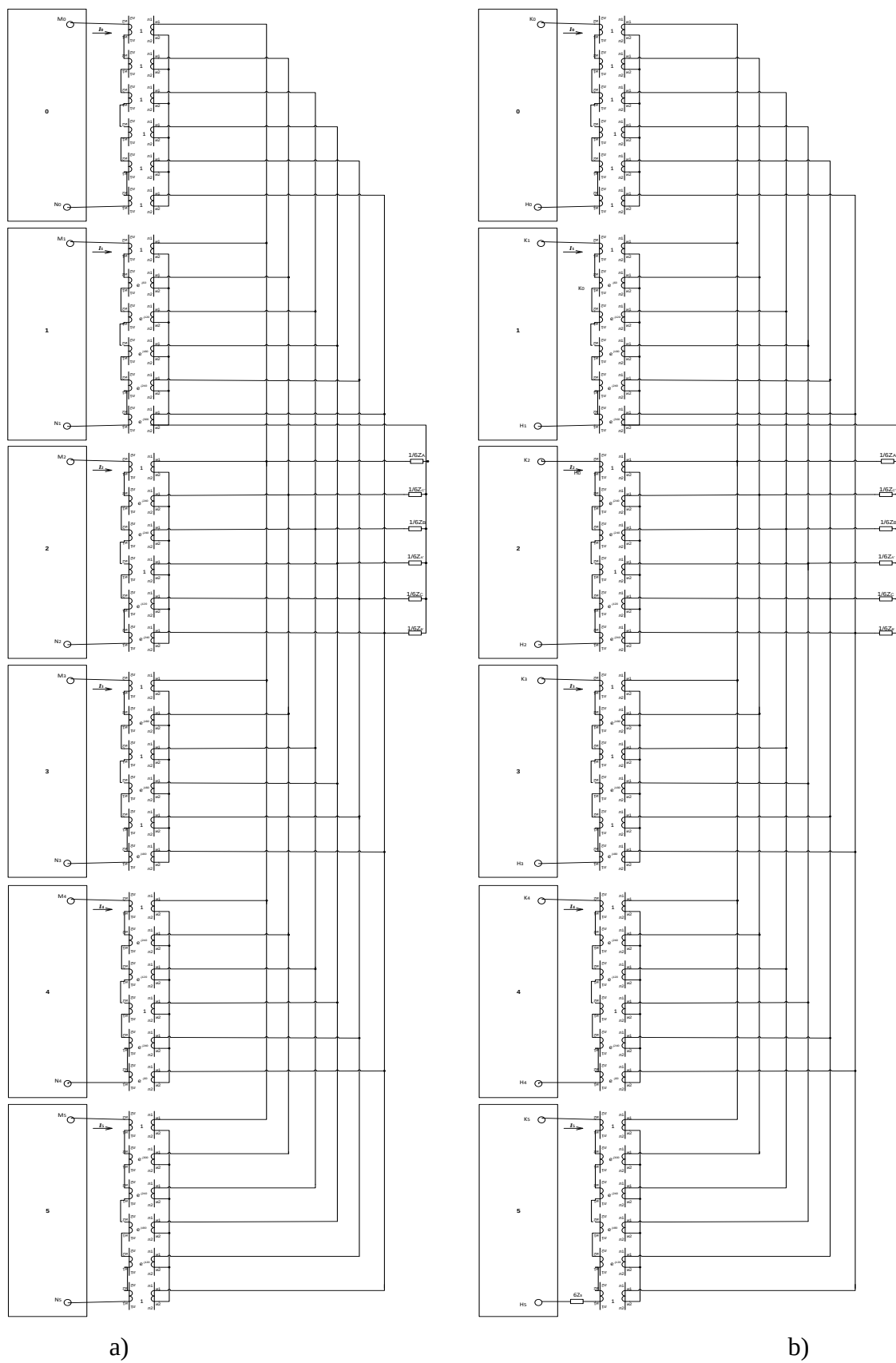


Fig. 2. Schemele echivalente complexe generalizate în coordonatele componentelor simetrice hexafazate pentru un caz generalizat de nesimetrie complexă: a) nesimetrie longitudinală și b) nesimetrie transversală pe LEACR

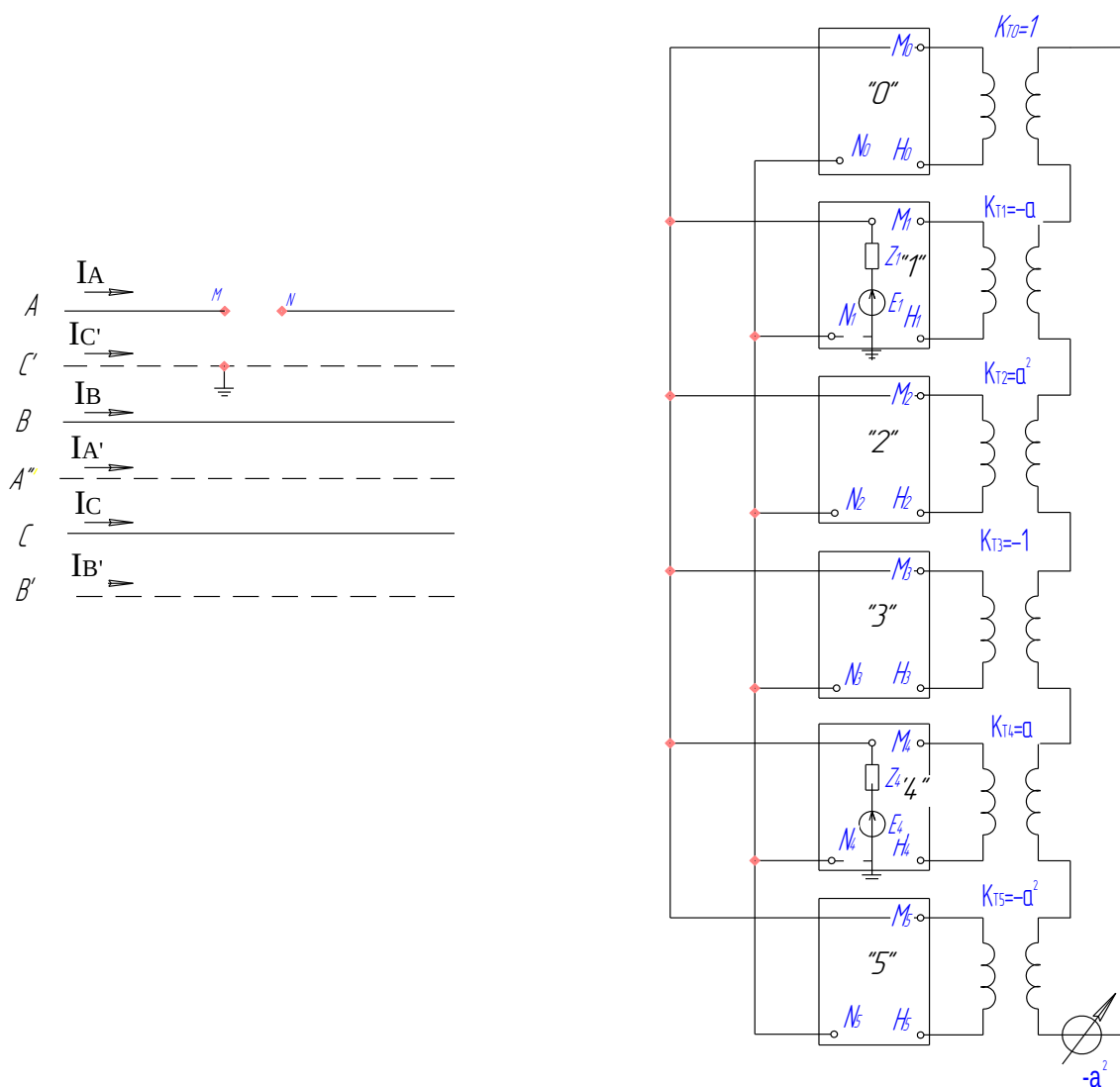


Fig. 3. Schema echivalentă complexă în coordonatele simetrice hexagonale la ruperea fazei A și scurtcircuitizarea la pământ a fazei C' pe LEAC

Pentru simplificarea analizei diferitor deteriorări simple și complexe pe LEACR și pe LEAC, este elaborată și propusă utilizarea simulării schemelor echivalente complexe la calculator în mediul aplicației seturilor de programe Multisim și Matlab-Simulink.

În capitolul trei "APROBAREA METODEI DE CALCUL A DETERIORĂRILOR COMPLEXE PE LEA HEXAFAZATĂ (LEACR) ÎN BAZĂ COMPONENTELOR SIMETRICE HEXAFAZATE", este verificată metodica elaborată pentru calcularea diferitor deteriorări complexe pe LEAC (LEACR) prin metoda componentelor simetrice hexafazate, folosind exemplul de calcul al rupei fazei A și scurtcircuitarea concomitentă a ei la pământ a unei LEA-110 kV cu lanț dublu prin metoda a trei componente simetrice și metoda componentelor

simetrice hexafazate și calculul ruperii fazei A și simultan scurtcircuitarea acesteia la pământ pe LEACR la $\theta=120^\circ$ și $\theta=180^\circ$.

Aprobarea metodei elaborate pe exemplul calculului ruperii de fază A și simultan scurtcircuitul acesteia la pământ pe o linie de transmitere a energiei electrice cu lanț dublu 110 kV prin metoda cunoscută a trei componente simetrice și metoda componentelor simetrice hexafazate este justificată, deoarece LEA obișnuită cu lanț dublu poate fi considerată ca caz particular al LEACR la $\theta = 0^\circ$ și distanțele dintre fazele „apropiate” corespunzând celor standard. Aceasta permite utilizarea atât a metodei celor trei componente simetrice cu luarea în considerație a legăturii mutuale reciproce dintre schemele de substituie de secvență homopolară a LEA cu lanț dublu, cât și metoda elaborată a componentelor simetrice hexafazate la calcularea scurtcircuitelor nesimetrice, unde schemele de substituie nu sunt legate între ele cu inductanță mutuală.

În fig. 4 este prezentată schema principală a unei LEA-110 kV cu lanț dublu cu alimentare bilaterală de la sistemele echivalente M și N cu o lungime de 70 km și conductoare AC-150 la ruperea fazei A a fost la începutul liniei și scurtcircuitarea aceiași faze A la pământ la o distanță de 30 km de la începutul liniei.

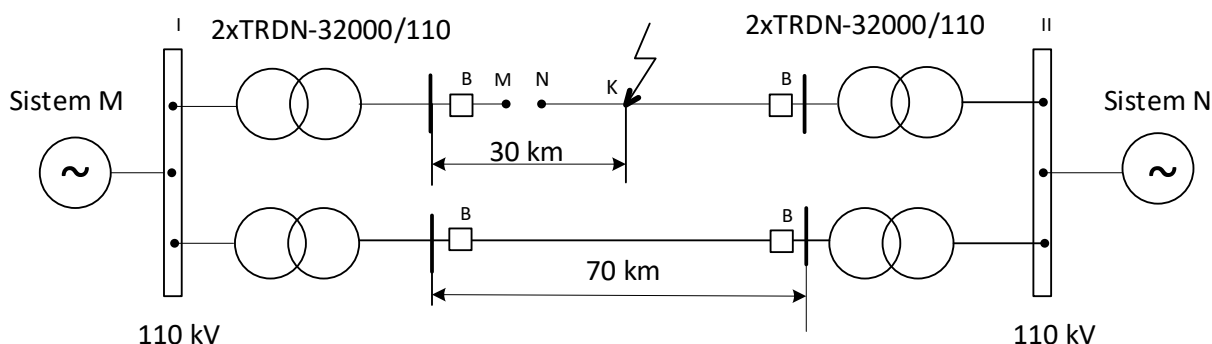


Fig. 4. Schema principală a LEA-110 kV cu lanț dublu la ruperea fazei A și Scurtcircuitarea concomitentă a ei la pământ

În fig. 5, 6 sunt date schemele echivalente complexe a LEA în coordonatele a trei componente simetrice 0,1,2 (fig. 5) și șase componente simetrice 0,1,2,3,4 și 5 (fig. 6) pentru deteriorările examinate.

Rezultatele calculului sunt prezentate în tabelul 2.

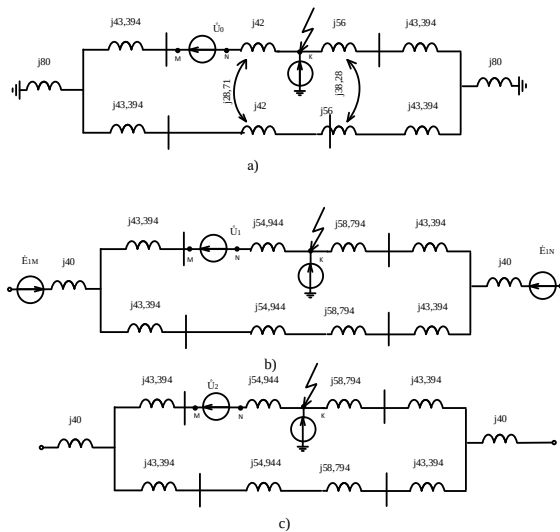


Fig. 5. Schemele echivalente ale LEA-110 kV cu dublu circuit în coordonatele a trei componente simetrice 0, 1, 2:
a) de secvența homopolară (zero); b) directă (unu); v) inversă (doi)

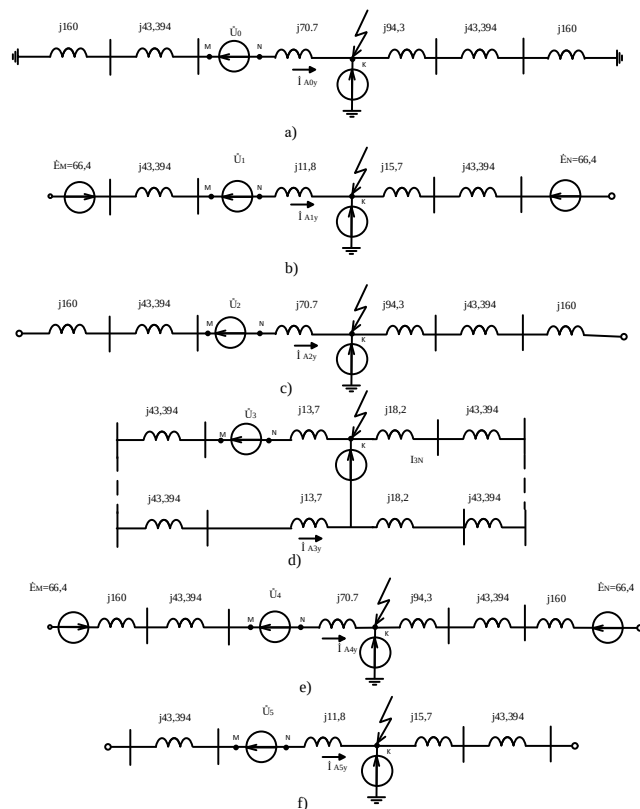


Fig. 6. Schemele echivalente ale LEA-110 kV cu lanț dublu în coordonatele a șase componente simetrice 0, 1, 2, 3, 4 și 5: a) secvența zero; b) unu; v) doi; g) trei; d) patru; e) cinci

Tabelul 2. Rezultatele calculelor curenților de fază în cazul unei întreruperi a fazei A cu scurtcircuitarea ei simultană la pământ pe o LEA-110 kV cu lanț dublu prin metoda a trei și șase componente simetrice

Curenți de fază din partea sistemului M	I linie			A II linie		
	$\dot{I}_A$	$\dot{I}_B$	$\dot{I}_C$	$\dot{I}_A$	$\dot{I}_B$	$\dot{I}_C$
Metoda componentelor simetrice 0,1,2	0	$0,748 e^{-j117^\circ}$	$1,27e^{j72^\circ}$	$0,096 e^{j180^\circ}$	$0,686 e^{j117^\circ}$	$1,56 e^{j72^\circ}$
Metoda componentelor simetrice 0,1,2,3,4,5	0	$0,8 e^{-j117^\circ}$	$1,2e^{j72^\circ}$	$0,09 e^{j180^\circ}$	$0,648 e^{j117^\circ}$	$1,492 e^{j72^\circ}$

Compararea rezultatelor calculelor prezentate în tabelul 2, obținute prin metoda cunoscută a trei componente simetrice și metoda a șase componente simetrice, demonstrează coincidența rezultatelor cu o deviere de circa 7%, ceea ce confirmă veridicitatea metodei elaborate și posibilitatea

aplicării ei în calculul deteriorărilor complexe pe LEAC și LEACR. Metoda elaborată poate fi aplicată și pentru calcularea deteriorărilor complexe ce pot avea loc pe LEA cu lanț dublu, simplificând calculele.

Rezultatele obținute sunt confirmate și prin simularea la calculator a deteriorărilor examinate, folosind programul Multisim și Matlab-Simulink. Conform schemei echivalente complexe generalizate a unei LEA hexafazate (LEAC, LEACR) prezentate în fig.2, schema echivalentă complexă modelată în mediul Multisim pentru LEA cu lanț dublu și deteriorările respective este prezentată în fig.7. Schema include conexiunea electrică în locul ruperii fazei A (secțiunea $M-N$) și conexiunea prin intermediul transformatoarelor ideale pentru scurtcircuitarea ei la pământ în locul de scurtcircuit (secțiunea $K-H$). Coeficienții de transformare a transformatoarelor ideale de interconexiune sunt determinați din tabelul 1.

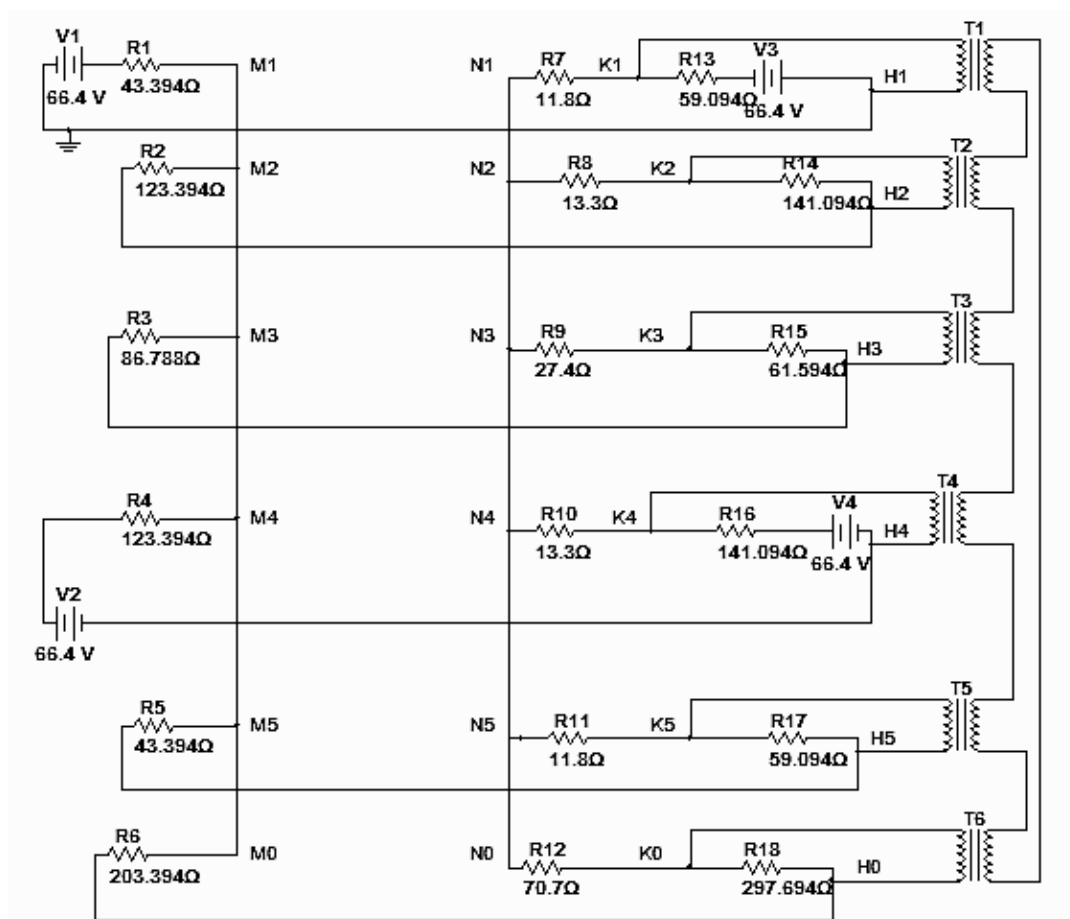


Fig. 7. Schema echivalentă complexă în cazul ruperii fazei A și scurtcircuitarea concomitentă a ei la pământ pe o LEA-110kV cu lanț dublu în programul Multisim

Veridicitatea și corectitudinea metodologiei elaborate sunt confirmate și prin compararea calculului ruperii fazei A pe o LEA de 220 kV cu dublu circuit cu alimentare bidirecțională prin metoda elaborată a șase componente simetrice și rezultatele calculelor acestei deteriorări prin

metoda a trei componente simetrice, prezentată în Culegerea de probleme: procese electromagnetice tranzitorii în sistemele electrice, editată de Ulianov S.A.

În fig. 8 este prezintă schema principiala a LEACR - 110 kV cu conductoare AC-150 și o lungime de 76 km la unghiul de defazaj dintre fazele apropiate $\theta=120^\circ$ la rupere fazei A cu scurt circuit la pământ.

Schemele echivalente în componentele simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 sunt prezentate în fig. 9.

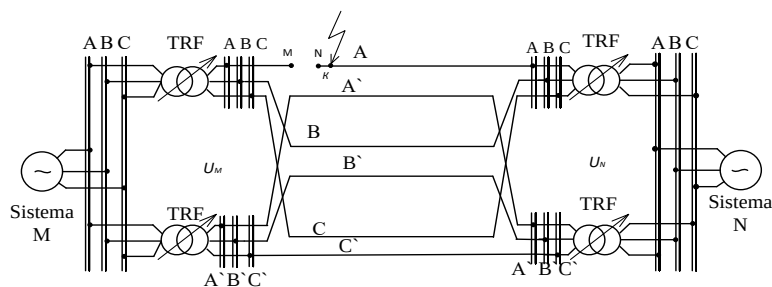


Fig.8. Schema principială a LEACR -110 kV la rupere fazei A cu scurt circuit la pământ

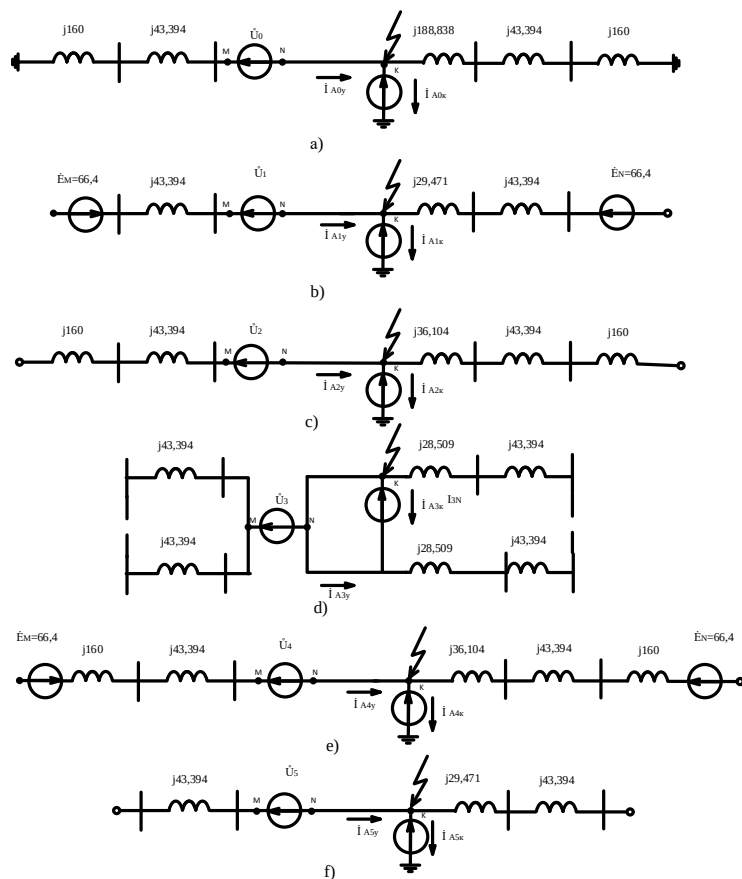


Fig.9. Schemele echivalente ale LEACR în coordonatele componentelor simetrice 0, 1, 2, 3, 4 și 5 a) zero; b) unu; c) doi; d) trei; patru; e) cinci

Determinarea curenților și tensiunilor pentru deteriorarea dată prin modelarea la calculatorul electronic este realizată conform schemei din fig.10.

Rezultatele calculului sunt prezentate în tabelul 3.

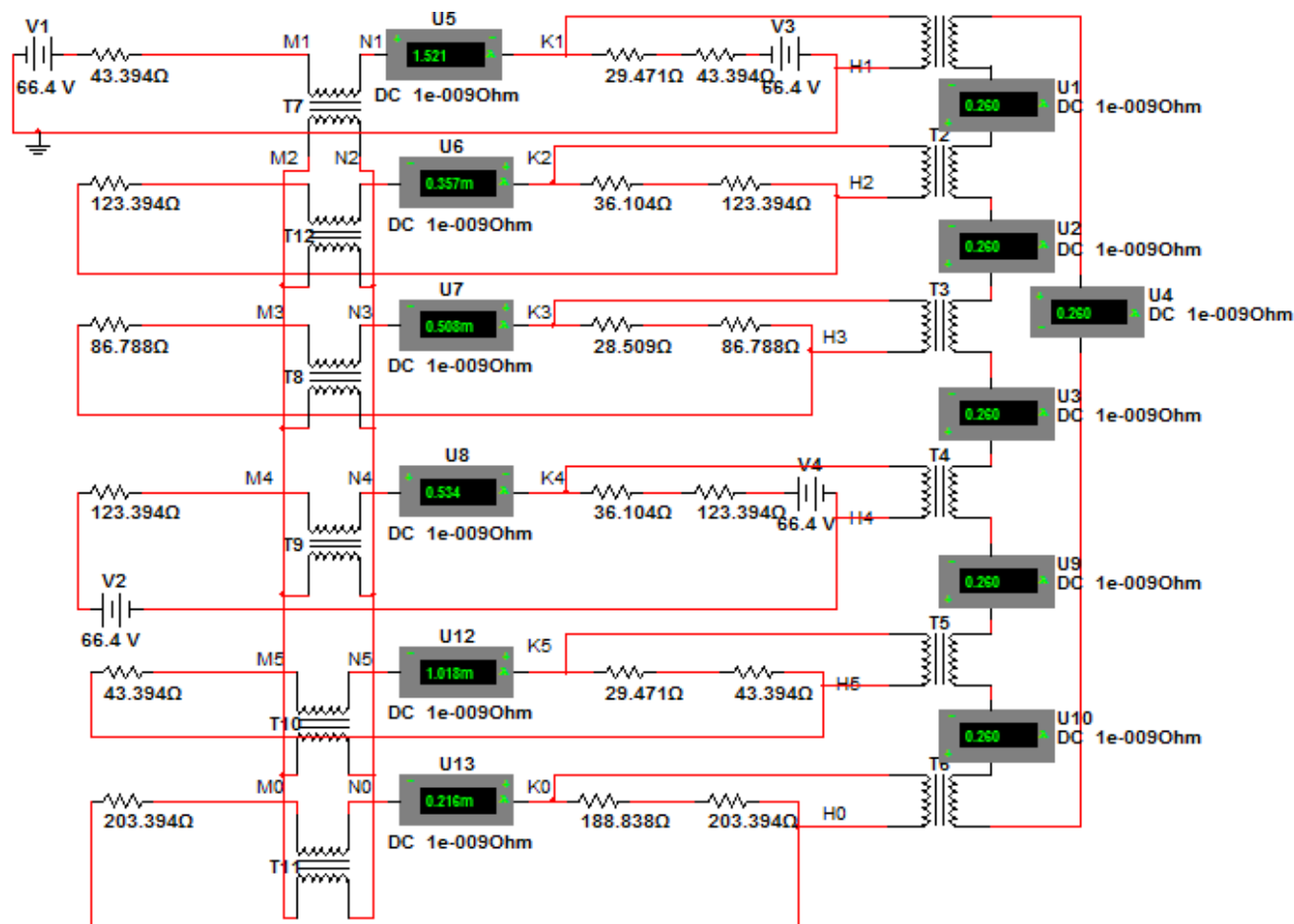


Fig. 10 Schema echivalentă complexă a LEACR cu unghiul $\theta=120^\circ$ la ruperea fazei A cu scurtcircuit simultan a ei la pământ în software-ul Multisim

Tabelul 3 Rezultatele calculului la ruperea fazei A cu scurtcircuit simultan a ei la pământ la $\theta=120^\circ$ și $\theta=180^\circ$

	$ I_A $	$ I_A' $	$ I_B $	$ I_B' $	$ I_C $	$ I_C' $
$\theta=120^\circ$	2,057	0,987	2,054	0,987	2,054	0,987
$\theta=180^\circ$	2,061	0,99	2,059	0,991	2,059	0,99

În conformitate cu metodologia elaborată în fig.11 este prezentată diagrama bloc a algoritmului de calcul a deteriorărilor complexe pe LEACR, folosind metoda componentelor simetrice hexafazate.

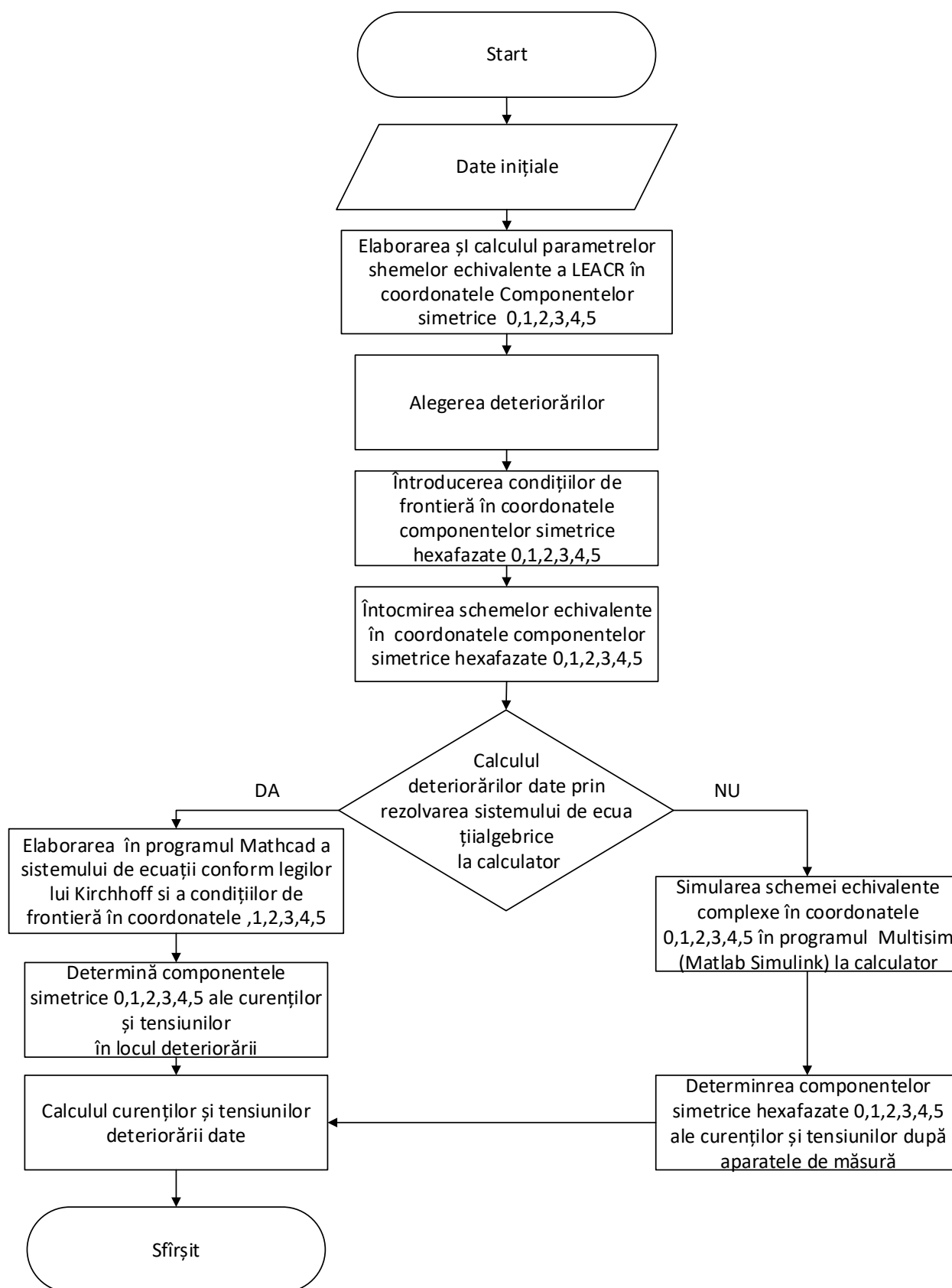


Fig. 11 Schema-bloc pentru calculul curenților și tensiunilor pentru diferite tipuri de deteriorări pe LEACR prin metoda componentelor simetrice hexafazate

Capitol patru "ELABORAREA FILTRELOR COMPONENTELOR SIMETRICE HEXAFAZATE", este consacrat elaborării filtrelor componentelor simetrice hexafazate, necesare pentru protecția prin relee a LEAC și LEACR.

Analiza apriorie a utilizării sistemelor de protecție prin relee existente pentru LEA obișnuite a demonstrat, că ele nu pot asigura o protecție sigură și viabilă a liniilor electrice cu autocompensare și autocompensare reglabilă (LEAC și LEACR) la diferite scurtcircuite nesimetrice, inclusiv complexe, datorită particularităților lor specifice.

Necâtând la acea, că apariția deteriorărilor complexe sunt nu atât de frecvente, din punctul de vedere al asigurării alimentării fiabile cu energie electrică a consumatorilor, „viabilitatea” liniilor, creșterea eficienței și sensibilității protecției prin relee și deconectarea selectivă a unor faze deteriorate, este necesară elaborarea pentru protecția LEAC și LEACR a unui sistem de protecției prin relee asistat de microprocesor, ce ar reacționa la apariția anumitor componente simetrice hexafazate, caracteristice deteriorării date.

Pentru elaborarea instalațiilor protecției prin relee și automatizări a LEAC (LEACR) cu reacționare la apariția diferitelor componente simetrice hexafazate la deteriorări simple și complexe (scurtcircuite și ruperi de fază), sunt necesare filtre de depistare a componentelor simetrice hexafazate.

În capitolul dat, sunt expuse bazele teoretice pentru crearea filtrelor de curent și tensiune ale componentelor simetrice hexafazate.

Presupunând, că la bornele de intrare ale filtrului de curent sunt aplicați curenții de fază $\dot{I}_A, \dot{I}_C, \dot{I}_B, \dot{I}_{A'}, \dot{I}_{C'}, \dot{I}_{B'}$ ai sistemului hexafazat a LEAC (LEACR), notăm componentele simetrice hexafazate atribuite fazei A prin $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_5$ la ieșirea filtrului. Acceptăm, că elementele componente ale filtrului reprezintă o funcție liniară a curenților $\dot{I}_A, \dot{I}_C, \dot{I}_B, \dot{I}_{A'}, \dot{I}_{C'}, \dot{I}_{B'}$ ai LEAC (LEACR).

Curentul la ieșirea filtrului:

$$\dot{I}_p = \dot{n}_A \cdot \dot{I}_A + \dot{n}_{C'} \cdot \dot{I}_{C'} + \dot{n}_B \cdot \dot{I}_B + \dot{n}_{A'} \cdot \dot{I}_{A'} + \dot{n}_C \cdot \dot{I}_C + \dot{n}_{B'} \cdot \dot{I}_{B'} \quad (8)$$

Aici, coeficienții $\dot{n}_A, \dot{n}_{C'}, \dot{n}_B, \dot{n}_{A'}, \dot{n}_C, \dot{n}_{B'}$ sunt valori complexe sau reale, ce caracterizează modificările de amplitudine și fază ale curenților de fază aplicați la intrarea filtrului. Înlocuirea curenților de fază ai LEAC (LEACR) cu componentele lor simetrice 0,1,2,3,4,5 poate fi descrisă prin formula:

$$\dot{I}_p = \dot{k}_0 \dot{I}_0 + \dot{k}_1 \dot{I}_1 + \dot{k}_2 \dot{I}_2 + \dot{k}_3 \dot{I}_3 + \dot{k}_4 \dot{I}_4 + \dot{k}_5 \dot{I}_5. \quad (9)$$

Coeficienții k ai filtrului (matricea 10) sunt reprezentați prin valori complexe sau reale în conformitate cu matricea S_6 (1) a trecerii de la curenții de fază la componentele lor simetrice 0,1,2,3,4,5. Prin transformarea inversă a matricei (10), prin coeficienții matricei k , obținem expresii pentru coeficienții n (matricea 11).

$$\begin{pmatrix} \dot{k}_0 \\ \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \\ \dot{k}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{n}_A \\ \dot{n}_{C'} \\ \dot{n}_B \\ \dot{n}_{A'} \\ \dot{n}_C \\ \dot{n}_{B'} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{n}_A \\ \dot{n}_{C'} \\ \dot{n}_B \\ \dot{n}_{A'} \\ \dot{n}_C \\ \dot{n}_{B'} \end{pmatrix} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{k}_0 \\ \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \\ \dot{k}_5 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Reeșind din expresiile prezentate mai sus, pentru realizarea filtrelor componentelor simetrice hexafazate, este necesară însumarea curenților sau tensiunilor care sunt în raporturi specifice cu valorile electrice aplicate filtrului.

Diferența (decalajul) de fază dintre curenții sau tensiunile respective poate fi realizată prin diferite metode de selectare corespunzătoare a elementelor componente ale filtrului: rezistențe, inductanțe, condensatoare, de tip mixt și cuplate inductiv.

În baza confirmărilor expuse, au fost elaborate schemele principale ale filtrelor curenților componentelor simetrice hexafazate pentru LEAC, prezentate în fig. 12 a, b, c.

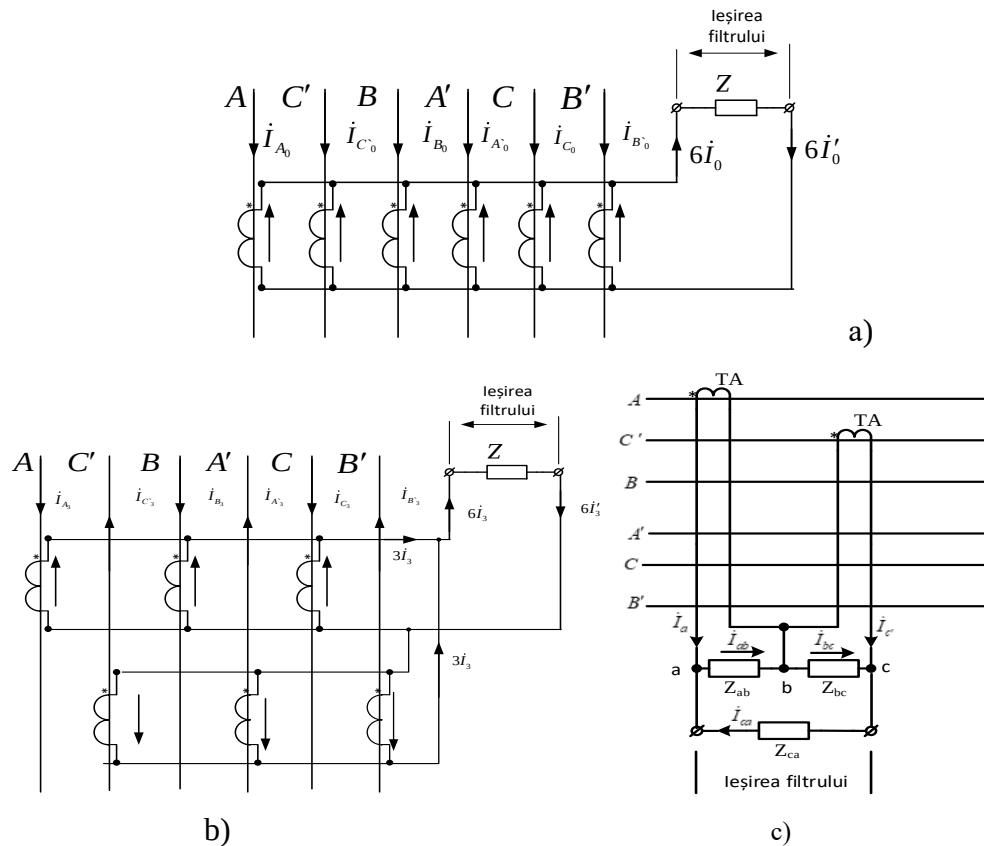


Fig. 12. Filtrele componentelor simetrice ale curenților de secvență zero (a), de secvență trei (b) și de secvență 1,2,4,5 (c) pentru LEAC

Filtrul componentei curentului cu secvență zero (fig. 12,a) se bazează pe principiul însumării curenților tuturor celor șase faze. Această sumare se realizează folosind transformatoare de curent prin conectarea înfășurărilor lor secundare în paralel. Filtrul curentului componentei de secvență terțiară (fig. 12,b) este format din transformatoare de curent, înfășurările secundare a căroră sunt conectate astfel, încât să se asigure diferența dintre sumarea curenților secundari a fazelor A, B, C, și curenților fazelor A', B', C' ai transformatoarelor de curent.

Având în vedere, că pentru protecțiile digitale moderne asistate de microprocesoare a LEAC și LEACR, este rațională depistarea matematică a curenților (tensiunilor) componentelor simetrice hexapolare pentru diferite scurtcircuite nesimetrice, inclusiv deteriorări complexe, a fost realizată modelarea la calculator a unui filtru combinat de componente simetrice hexapolare 0, 1, 2, 3, 4, 5 cu aplicarea complexului de calcul (software) Matlab-Simulink, fig. 13.

Pentru realizarea tehnică a modelului de filtrului în biblioteca de Operații matematice, au fost utilizate următoarele blocuri funcționale:

- Blocul *Constant* – formează constantele: operatorii de sistem $a = e^{j120^\circ}$ și $-a = e^{-j60^\circ}$;
- Blocul *Math* - îndeplinește funcții matematice: ridicarea la putere a operatorului a și $-a$;
- Blocul *Product* - efectuează înmulțirea datelor expuse, conform expresiei matriceale:

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{A0} \\ \dot{F}_{A1} \\ \dot{F}_{A2} \\ \dot{F}_{A3} \\ \dot{F}_{A4} \\ \dot{F}_{A5} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_{A'} \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_{B'} \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_{C'} \end{bmatrix} \quad \text{- pentru LEACR.} \quad (12)$$

Pentru LEAC în matricea (12) este necesar să se țină cont de succesiunea fazelor respective:

- Blocul *Sum* – sumează componentele de fază la intrări, conform (12);
- Blocul *Gain* – înmulțește semnalul de intrare cu valoarea constantă (1/6), conform (11).

Pentru testarea modelului elaborat a filtrului componentelor simetrice hexafazate din fig. 13, în programul Matlab-Simulink, a fost compilat un model complex al unei linii electrice cu șase faze, folosind exemplul unei LEA cu lanț dublu cu alimentare bidirecționată (ca caz particular a LEAC, LEACR) la care s-a conectat modelul filtrului combinat a componentelor simetrice hexafazate.

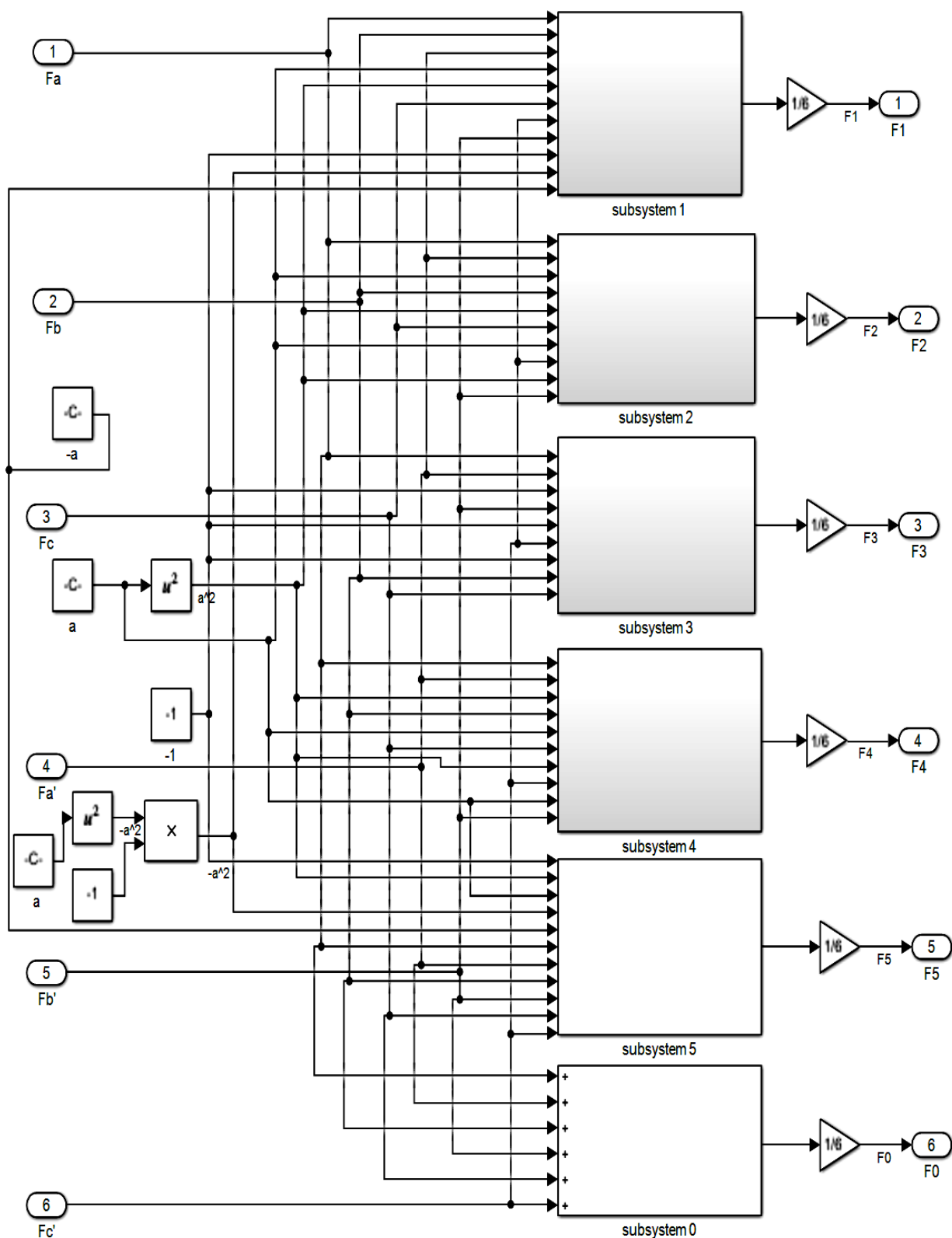


Fig. 13. Modelul de simulare a filtrului combinat a componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 a curenților (tensiunilor) LEAC și LEACR, realizat prin aplicarea complexului informațional Matlab-Simulink

Au fost determinați curenții și tensiunile în regim de funcționare normală și în regim de scurtcircuit a fazei A la pământ a LEA cu lanț dublu. În fig. 14, 15 sunt prezentate oscilogramele curenților de fază și a componentelor lor simetrice la scurtcircuit monofazat la pământ a fazei A. Intervalul de timp inițial al oscilogramelor (până la aproximativ 0,3 s) corespunde funcționării normale, intervalul final corespunde apariției scurtcircuitului monofazat la pământ.

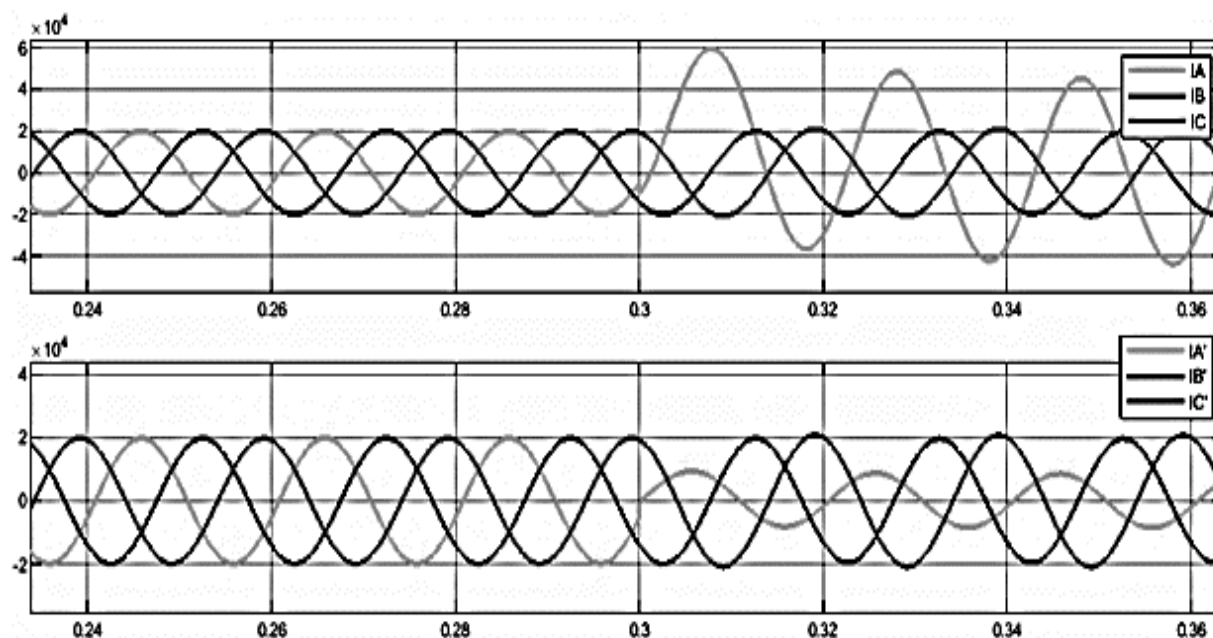


Fig. 14. Oscilogramele curenților de fază la scurtcircuitul fazei A la pământ a LEA cu lanț dublu

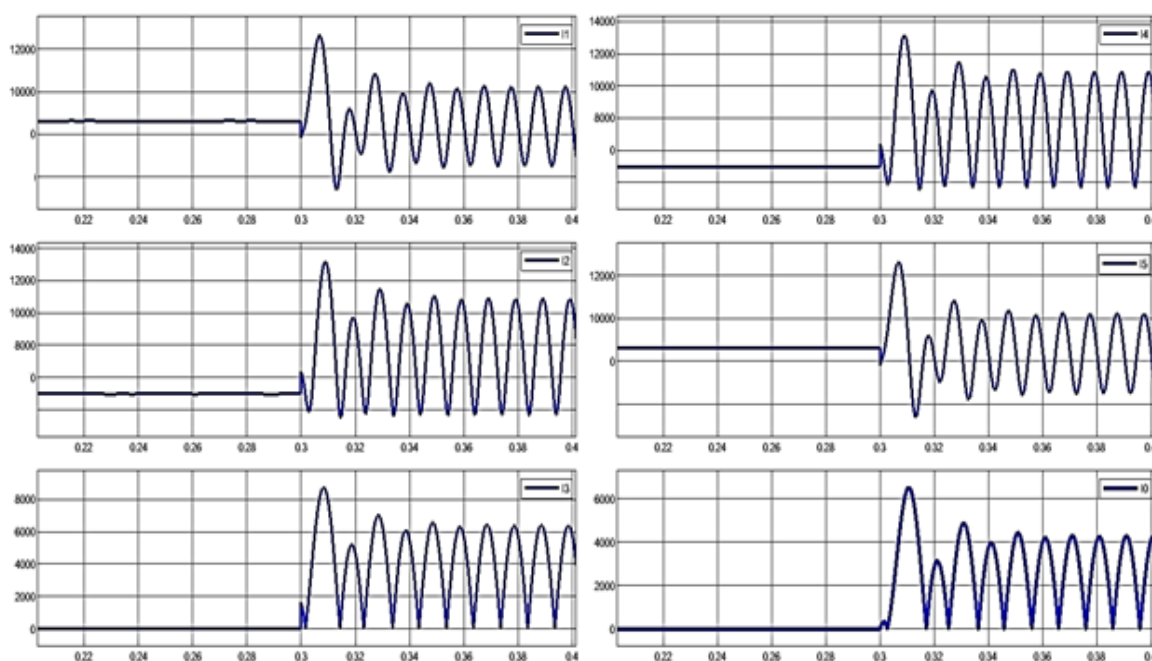


Fig. 15. Oscilogramele componentelor simetrice a succesiunii 0,1,2,3,4,5 a curenților la scurtcircuitul fazei A la pământ a LEA cu lanț dublu

Precum și era de așteptat, în regim normal de funcționare a LEA, componentele simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 ale curenților la ieșirea filtrului sunt egale cu zero, fapt vizibil din fig. 15 (în timp de 0-0,3 sec.). În regim de scurtcircuit monofazat al fazei A la pământ, la ieșirea filtrului apar componentele simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5, cea ce confirmă operabilitatea filtrului modelat.

Concluzii generale

În lucrarea de teză fost elaborată metodologia teoretică și o nouă metoda practică de calcul a valorilor electrice (curenți și tensiuni) la diferite deteriorări complexe ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, elaborată teoria, scheme principiale și modelele matematice în mediul aplicativ Matlab-Simulinc a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, necesare pentru elaborarea unei protecții viabile și efective prin relee a LEAC și LEACR.

Principalele rezultate teoretice și calcule experimentale prin simularea computațională ale lucrării sunt următoarele:

1. Studiarea și implementarea liniilor electrice cu autocompensare cu capacitate sporită de transmitere a energiei electrice LEAC și a liniilor electrice cu capacitate reglabilă de transmitere a energiei electrice LEACR, necesită soluționarea unui șir de probleme, inclusiv cele legate de protecția prin relee și de automatizare în baza calculelor tuturor deteriorărilor posibile, inclusiv deteriorări nesimetrice complexe: întreruperi de fază și scurtcircuite ce pot avea loc.

2. Dacă la calcularea scurtcircuitelor trifazate și hexafazate ce pot avea loc pe LEAC și LEACR poate fi aplicată metoda coordonatelor de fază, efectuând calculul în dependență de schema de substituie monofazată a lor, atunci calculul scurtcircuitelor nesimetrice este destul de complicat, practic imposibil, deoarece este necesară efectuarea calculului cu luarea în considerație a schemelor de substituie a tuturor celor șase faze, legate între ele prin inducții mutuale reciproce.

3. Utilizarea metodelor existente a trei componente asimetrice $x,y,0$; $r,s,0$; $\alpha,\beta,0$ și simetrice 0,1,2 pentru calcularea scurtcircuitelor nesimetrice pe liniile electrice cu autocompensare (LEAC) și liniile electrice cu autocompensare reglabilă (LEACR) este mai oportună decât metoda coordonatelor de fază, dar nu simplifică semnificativ calculul, deoarece nu diagonalizază complet matricea parametrilor pasivi ale acestor linii și, în consecință, unele scheme echivalente ale LEAC și LEACR în coordonatele respective vor fi legate între ele deasemenea prin inducții mutuale reciproce.

4. Considerând LEAC și LEACR ca linii electrice hexafazate, cu luarea în considerație a specificului lor, precum influența electromagnetică sporită cu un unghi fixat de $\theta = 120^\circ$ dintre

tensiunile fazelor apropiate ale LEAC sau un unghi θ variabil dintre tensiunile fazelor apropiate ale LEACR, a fost elaborată în baza componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 metoda de calcul a scurtcircuitelor nesimetrice simple ce pot avea loc pe LEAC și LEACR. Utilizarea componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 la calcularea scurtcircuitelor nesimetrice simple ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, permite diagonalizarea completă a matricei parametrilor lor pasivi. Aceasta dă posibilitatea de-a calcula scurtcircuitele nesimetrice simple ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, folosând schemele echivalente ale lor în coordonatele componentelor simetrice hexafazate 0, 1, 2, 3, 4, 5, ce nu sunt legate între ele prin inductanță reciprocă.

5. Studiarea și elaborarea unor protecții prin relee moderne și eficiente pentru protecția LEAC și LEACR necesită de rând cu calcularea scurtcircuitelor nesimetrice simple și calcularea scurtcircuitelor nesimetrice compuse: întreruperi de faze simultan cu scurtcircuite nesimetrice în același loc sau în locuri diferite.

6. Investigațiile prezentate în această lucrare demonstrează, că metoda componente simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 poate fi utilizată cu succes și pentru calcularea deteriorărilor nesimetrice complexe ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, cum ar fi întreruperi de faze concomitent cu scurtcircuite nesimetrice în aceaș loc sau în locuri diferite.

7. În baza condițiilor de frontier în locurile deteriorărilor, trecând de la condițiile de frontieră exprimate în coordonate de fază la condițiile de frontieră exprimate prin componente simetrice hexafazate, s-a elaborat metoda și formulele generalizate pentru calcularea diferitor deteriorări complexe ce pot apărea pe LEAC și LEACR.

8. Pentru verificarea metodei elaborate, au fost efectuate calcule ale unor deteriorări complexe: întrerupere și scurtcircuit la pământ a fazei A pe o linie de obișnuită cu lanț dublu de 110 kV cu o lungime de 70 km, ca un caz particular a LEAC și LEACR, prin metoda a trei componente simetrice 0,1,2 și metoda elaborată a componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5, ce au demonstrat o co incidență perfectă a calculelor cu o deviere medie de 7%.

9. Veridicitatea metodei elaborate a fost confirmată și prin simularea la calculator a aceleiași scurtcircuite nesimetrice simultane cu ruptură de fază la pământ într-un loc și în locuri diferite pe aciaș LEA-110kVcu lanț dublu, cu ajutorul ptogramelor-soft Multisim și Matlab-Simulinc, folosind componente simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5.

10. Calculele, modelarea lor la calculator, testările și verificările efectuate confirmă fiabilitatea și acceptabilitatea aplicării metodei a șase componente simetrice și pentru calcularea deteriorărilor nesimetrice complexe ce pot avea loc pe LEAC și LEACR.

11. Aplicarea metodei elaborate a componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 la calcularea deteriorărilor complexe, precum sunt întreruperi de faze simultan cu scurtcircuite

nesimetrice în același loc sau în locuri diferite pe LEAC și LEACR a demonstrat, că ca și în cazul scurtcircuitelor nesimetrice simple, diferitor scurtcircuite nesimetrice complexe le este caracteristic "apariția" diferitor componente simetrice hexafazate a curenților și tensiunilor. Aceasta permite elaborarea unor sisteme de protecție prin relee eficiente și sensibile pentru LEAC și LEAR, bazate pe depistarea și selectarea componentelor simetrice hexafazate respective.

12. Ca și în cazul liniilor electrice clasice, pentru crearea unei protecții prin relee moderne, eficiente, fiabile, sensibile și selective a LEAC și LEACR, inclusiv asistată de microprocesoare, este necesar de-a utiliza filtre ale componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5. După cum s-a menționat, diverselor scurtcircuite nesimetrice corespunde „apariția” anumitor componente simetrice, care pot servi ca semn distinctiv de „recunoaștere” a scurtcircuitului dat și pot asigura sensibilitatea protecției prin relee a LEAC și LEACR.

13. Reieșind din aceasta, în lucrare au fost dezvoltate în continuare bazele teoretice și elaborată o metoda generalizată de realizare a filtrelor componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5 pentru utilizarea acestora în crearea protecției prin relee și automatizare a LEAC și LEACR.

14. Pentru crearea unei protecții moderne asistată de microprocesor a LEAC și LEACR, a fost elaborat modelul mathematic și de modelare la calculator în mediul Matlab-Simulink a filtrelor componentelor simetrice hexafazate 0,1,2,3,4,5.

Rezultatele cercetării au fost confirmate de 11 publicații și raportate la opt conferințe.

Publicații pe tema tezei

1. KIORSAK, M., **TURTURICA, N.** Simulation of Filters of Six Symmetrical Components of Currents (Voltages) of Controlled Self-Compensating Power Lines. In: *International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. 2021, pp. 371-375, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600391. ISBN 978-1-6654-0079-4.
2. KIORSAK, M., **TURTURICA, N.** Methodology for Assessment the Possibility of Transfer Six-Phase Power Line into the Mode of Operation with Incomplete Number of Phases. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2020, nr. 1(45), pp. 51-58, doi: 10.5281/zenodo.3723643. ISSN 1857-0070.
3. KIORSAK, M., TURCUMAN, L., **TURTURICA, N.** Principiul de elaborare a protecției prin relee a liniilor electrice aeriene cu autocompensare la scurtcircuite nesimetrice dintre fazele apropiate. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2015, nr. 3(29), pp. 63-66. ISSN 1857-0070.
4. **TURTURICA, N.** Modeling Filters of Six Symmetrical Components of Controlled Self-compensating Power Transmission Lines. In: *Global Journal of Research in Engineering*. july 2020, S1, pp. 40-46. USA ISSN 2249-4596.
5. **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Самокомпенсирующиеся линии электропередач, расчёт электрических величин при повреждениях. В: *Современная школа России. Вопросы модернизации*. Москва: Открытый Мир, 2021, № 8(37), с. 234-237. ISSN 2306–8906.
6. **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Эквивалентные схемы замещения при расчёте простых несимметричных коротких замыканий на самокомпенсирующихся линий электропередач методом шести симметричных составляющих. В: *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей XI международной научной конференции*. Казань: ООО «Конверт», 29–30 ноября 2021, с. 97-99. ISBN 978-5-6047189-7-1.
7. **КИОРСАК, М.В, ТУРКУМАН, Л.В, ТУРТУРИКА, Н.Н.** Расчет электрических величин для релейной защиты многофазных линий электропередачи. In: *Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare*. Ediția III, 29 septembrie - 1 octombrie 2016, Chișinău. Chișinău, Republica Moldova: Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei, 2016, pp. 226-231. ISBN 978-9975-4123-5-3.
8. KIORSAK, M., TURCUMAN, L., **TURTURICA, N.** Computer simulation of the complex damage types of multiphase higher voltage electrical transmission lines by using the method of six symmetrical components. In: *SIELMEN 2017: Proceedings of the 11-th international conference on electromechanical and power systems*. Chișinău: 11-13 octombrie, 2017, pp. 225-230. ISBN 978-1-5386-1846-2.

9. **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Обобщённая схема замещения для расчёта обрывов фаз на шестифазных ЛЭП методом симметричных составляющих. In: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători*. Chișinău, Republica Moldova: Universitatea Academiei de Științe a Moldovei, 15 martie 2016, Ediția 5, Vol.2, pp. 63-65. ISBN 978-9975-75-836-9.

10. **ТУРТУРИКА, Н.** Теоретические основы методики расчета сложных видов повреждений на многоцепных линиях электропередачи. In: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători*. Chișinău, Republica Moldova: Universitatea Academiei de Științe a Moldovei, 10 martie 2015, p. 44.

11. **TURTURICA, N.** Development of six-phase symmetrical components filters for self-compensating power lines. In: *Journal of Engineering Science*. 2022, Vol. XXIX (2), pp. 46-53. ISSN 2587-3474.

ADNOTARE

Turturica Natalia, „Elaborarea metodei de calcul a deteriorărilor complexe pe liniile electrice cu autocompensare și crearea filtrelor componentelor simetrice hexafazate”, teză de doctor în științe inginerești, Chișinău, 2023.

Structura tezei: introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, o listă bibliografică de 172 de titluri, 143 de pagini, 65 de figuri, 8 tabele. Pe baza materialelor cercetării, au fost publicate 11 publicații.

Cuvinte- cheie: linii electrice cu autocompensare (LEAC), linii electrice cu autocompensare reglabilă (LEACR), deteriorări complexe, scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze, metoda a șase componente simetrice, circuite echivalente complexe, filtre hexafazate.

Scopul lucrării: elaborarea bazei teoretice a metodologiei și a metodei de calcul a deteriorărilor complexe – scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, crearea filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecției prin relee a LEAC și LEACR.

Obiectivele cercetării: elaborarea metode adecvate și corecte de calcul a deteriorărilor complexe: scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, ținând cont de particularitățile de funcționare ale acestora la orice unghi de deplasare a vectorilor tensiunilor aplicate dintre fazele apropiate și a filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecția prin relee.

Noutatea și originalitatea științifică- este elaborată metodologia teoretică și metoda de calcul a mărimilor electrice la diferite deteriorări complexe pe LEAC și LEACR, prezentată teoria și sunt elaborate schemele electrice și modelele matematice de modelare la calculator în Matlab-Simulink a filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecția prin relee. Metoda elaborată are un caracter general și poate fi aplicată și la calculul deteriorărilor complexe: scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze ce pot avea loc în orice circuit hexafazat, inclusiv LEA cu lanț dublu.

Rezultatele obținute care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante: este elaborată metodologia de calcul și analiză a mărimilor electrice, curenților și tensiunilor, la deteriorări complexe ce pot avea loc pe LEAC și LEACR ce are un caracter universal și poate fi aplicată la calculul deteriorărilor complexe ce pot avea loc în diferite circuite electrice hexafazate, este elaborat principiul teoretic, schemele principiale fizice și de modelare la calculator a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, ce permit elaborarea unei protecții prin relee eficientă pentru LEAC și LEACR.

Semnificația teoretică: elaborarea unei metodologii universale, practice și aplicabile pentru practica inginerescă pentru calcularea deteriorărilor complexe pe LEAC și LEACR și în orice circuit electric hexafazat, metodei de creare și modelare la calculator a filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecția prin relee a LEAC și LEACR.

Valoarea aplicativă: metoda de calcul a deteriorărilor complexe și a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, necesare pentru studierea și elaborarea unei protecții prin relee eficiente la implementarea LEAC și LEACR. Metoda și abordările propuse pot fi utilizate pentru a calcula și analiza deteriorările complexe și elaborarea protecției prin relee a oricărei sisteme hexafazate.

Implementarea rezultatelor științifice: rezultatele lucrării pot fi utilizate în cercetări teoretice și experimentale la calcularea deteriorărilor complexe pe LEAC și LEACR și în orice circuit electric hexafazat, la elaborarea protecției prin relee la proiectarea și implementarea LEAC și LEACR.

TURTURICA NATALIA

**ELABORAREA METODEI DE CALCUL A DETERIORĂRILOR COMPLEXE PE
LINIILE ELECTRICE CU AUTOCOMPENSARE ȘI CREAREA FILTRELOR
COMPONENTELOR SIMETRICE HEXAFAZATE**

221.01. SISTEME ȘI TEHOLOGII ENERGETICE

Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești

Aprobat pentru imprimare: 14.06.23

Hîrtie offset. Tipar RISO..

Foi tipărite: 1,03

Dimensiunea hartiei 60x84 1/16

Tiraj 35 copii

Comanda Nr.

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

© 2023