

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris
C.Z.U.:621.31:004.94:514.742(043)

MURDID ECATERINA

**ELABORAREA MODELELOR MATEMATICE
ALE ELEMENTELOR SISTEMELOR ELECTROENERGETICE
BAZATE PE TEHNOLOGIA MĂSURĂRILOR
FAZORIALE SINCRONIZATE**

221.01. SISTEME ȘI TEHNOLOGII ENERGETICE

Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești

CHIȘINĂU, 2023

Teza a fost elaborată în cadrul Departamentului de Energetica, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Conducător:

STRATAN Ion, doctor în științe tehnice, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei

Referenți oficiali:

CHORSAC Mihail, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei;

RADILOV Tudor, doctor în științe tehnice.

Componența consiliului științific specializat:

ARION Valentin, președinte, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar;

GUȚU-CHESTRUȘCA Corina, secretar științific, doctor în științe tehnice, lector universitar;

AMBROS Tudor, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar;

GROPA Victor, doctor în științe tehnice, conferențiar universitar;

HLUSOV Viorica, doctor în științe tehnice, conferențiar universitar;

CHELMENCIUC Corina, doctor în științe tehnice, conferențiar universitar.

Susținerea va avea loc la 28 decembrie 2023 ora 09.00 în ședința Consiliului științific specializat **D 221.01-23-97** din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, str. 31 august, 78, etajul 2, sala nr. 2-222, Chișinău, Republica Moldova.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a ANACEC.

Rezumatul a fost expediat la _____.2023

Secretar științific al Consiliului științific specializat,
GUȚU-CHESTRUȘCA Corina, dr. șt. tehn., lect. univ

Conducător

STRATAN Ion, doctor în științe tehnice, prof. univ.

Autor

MURDID Ecaterina

CUPRINS

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
CONȚINUTUL TEZEI	8
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	25
BIBLIOGRAFIE	27
LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI LA TEMA TEZEI	29
ADNOTARE	30
АННОТАЦИЯ	31
ANNOTATION	32

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea și importanța temei abordate. În prezent sistemul electroenergetic (SEE) al Republicii Moldova se caracterizează cu o pondere în creștere a generării distribuite, un nivel scăzut de modernizare a echipamentului electric, un grad ridicat de uzură și o finanțare slabă pentru activitățile de întreținere și reparații. Eficacitatea gestionării unui astfel de sistem depinde direct de acuratețea și fiabilitatea atât a informațiilor primite despre starea sistemului, cât și a modelelor matematice utilizate pentru a-l descrie. Numeroase studii (lucrări de A.Z. Gamm, T.B. Zaslavskaya, V.I. Idelchik, V.Z. Manusov, N.A. Melnikov, A.S. Novikov, S.I. Palamarchuk, M. Gavrilaş, J.W. Rittenhouse, J. Zaborszky etc.) dovedesc că parametrii schemelor echivalente, pe baza cărora sunt formate modelele matematice, se pot modifica sub influența factorilor externi pe parcursul funcționării. În același timp, crearea noilor scheme echivalente sau actualizarea celor existente este dificilă din cauza inadmisibilității experimentelor la scară completă și a imposibilității modelării fizice în volumul necesar. În acest context, dezvoltarea tehnologiilor de măsurare fazorială sincronizată (MFS) va asigura un impuls semnificativ pentru îmbunătățirea modelării matematice a SEE.

Tehnologia măsurătorilor fazoriale sincronizate se bazează pe utilizarea unor dispozitive speciale (PMU - Phasor Measurement Unit) [1], care realizează măsurarea de înaltă precizie a fazorilor de tensiune în noduri și a curenților din ramurile incidente acestor noduri. Fiecare astfel de măsurare este sincronizată în timp folosind un sistem de navigație prin satelite (GPS și/sau GLONAS), care asigură o „amprentă” a rețelei observate în orice moment de timp. Astfel, pe baza unui sistem de dispozitive de măsurare fazorială sincronizată, se asigură suportul informațional atât pentru procesul de gestionare a sistemului de alimentare, cât și pentru procesul de actualizare a modelelor matematice ale SEE. În cazul în care în Republica Moldova sunt implementate în paralel două proiecte importante pentru creșterea securității aprovizionării cu energie electrică (Proiectul de conectare sincronă a SEE din Republica Moldova și Ucraina cu sistemul ENTSO-E, precum și proiectul de integrare a SEE al Republicii Moldova cu SEE al României prin construirea liniilor electrice de 400 kV), problemele privind utilizarea pe scară largă a tehnologiei MFS și îmbunătățirea modelelor matematice ale SEE național devin tot mai actuale și mult mai importante. Datorită implementării tehnologiei MFS, operatorul de sistem din Moldova va primi instrumente precise și fiabile pentru gestionarea regimurilor de funcționare ale rețelelor, pentru monitorizarea și diagnosticarea echipamentelor, pentru răspunsul rapid la defecțiuni și avarii în rețea. Odată cu îmbunătățirea tehnologiilor informaționale și introducerea sistemelor informatice automatizate, va fi posibilă identificarea automată a parametrilor schemelor echivalente, fără a interfera cu procesul tehnologic de funcționare a echipamentelor, precum și generarea automată a bazelor de date ale

echipamentelor fără participarea operatorului.

Astfel, este necesar să se efectueze cercetări privind identificarea parametrilor elementelor ale SEE pe baza datelor MFS. Din motivele economice și tehnice, de regulă, dispozitivele PMU nu sunt instalate în fiecare nod al rețelei, așa că se pune problema determinării nodurilor critice (din punct de vedere al observabilității a SEE) în care ar trebui să fie instalate PMU-urile. Din același motiv, este necesar de luat în considerare problemele privind utilizarea simultană a datelor din MFS și sistemele tradiționale de măsurare pentru analiza regimurilor de funcționare ale SEE. Acestor probleme li se acordă, de asemenea, o atenție deosebită în această lucrare.

Scopul lucrării constă în dezvoltarea metodelor și algoritmilor de modelare matematică a elementelor ale SEE pe baza implementării tehnologiei MFS.

În vederea atingerii scopului expus, au fost stabilite următoarele **obiective principale**:

1. Justificarea intervalelor reale privind modificarea parametrilor liniilor electrice și transformatoarelor de putere, precum și identificarea factorilor care au cel mai semnificativ impact asupra acestor modificări;
2. Analiza lucrărilor științifice și cercetărilor privind posibilitățile de utilizare a măsurătorilor PMU pentru rezolvarea problemelor practice din domeniul electroenergetic;
3. Dezvoltarea și cercetarea metodelor de determinare a parametrilor pasivi ai schemelor echivalente ale liniilor electrice și transformatoarelor de putere bazate pe utilizarea tehnologiei MFS;
4. Dezvoltarea algoritmilor pentru amplasarea optimă a dispozitivelor PMU, ținând cont de asigurarea observabilității a SEE și minimizarea costurilor de achiziție și instalare a acestor dispozitive;
5. Cercetarea algoritmilor propuși pentru amplasarea optimă a PMU-urilor în privința posibilității de creștere a fiabilității și vitezei de calcul al regimului permanent de funcționare a SEE;
6. Cercetarea posibilității de simplificare a procesului de evaluare a stării statice a SEE prin utilizarea datelor MFS.

Obiectele cercetării sunt modele matematice ale liniilor electrice și transformatoarelor de putere pentru clasele de tensiune de 35-330 kV, infrastructura de informare și măsurare, scheme test IEEE.

Subiectul cercetării îl constituie metode și tehnici de identificare a parametrilor schemelor echivalente ale elementelor ale SEE, algoritmi pentru amplasarea optimă a PMU-urilor, precum și metode de calcul accelerat al regimului permanent și evaluarea stării statice a rețelei electrice.

La efectuarea studiului, au fost utilizate diverse forme de scriere ale ecuațiilor nodale ce

descriu regimurile de funcționare ale elementelor din SEE, metodele de optimizare și metoda tensiunilor nodale determinante. Software-ul RastrWIN a fost folosit pentru a efectua calcule, inclusiv pentru scheme test IEEE.

Noutatea și originalitatea științifică a tezei: s-au dezvoltat metode de identificare a parametrilor pasivi ai schemelor echivalente liniile electrice și transformatoarele de putere, bazate pe măsurări fazoriale sincronizate realizate în unul sau două regimuri, s-au dezvoltat algoritmi pentru amplasarea optimă a dispozitivelor MFS, care, pe lângă asigurarea numărului minim de PMU-uri pentru amplasarea în nodurile de rețea, poate îmbunătăți fiabilitatea și viteza calculului ale regimului permanent de funcționare și evaluarea stării statice datorită simplificării semnificative a sistemului de ecuații ce descrie regimul analizat.

Semnificația teoretică. Acest studiu aduce contribuții științifice la calculul și analiza regimului permanent al SEE, la metodologia de determinare a parametrilor pasivi ai schemelor echivalente fără teste la scară completă, precum și la dezvoltarea modelelor matematice pentru optimizarea amplasării PMU-urilor în nodurile SEE.

Valoarea aplicativă. Pentru prima dată, a fost elaborată o clasificare a metodelor de identificare a parametrilor elementelor ale SEE pe baza utilizării tehnologiei MFS. Clasificarea se bazează pe împărțirea metodelor în conformitate cu ecuațiile originale utilizate pentru a identifica parametrii schemelor echivalente ale elementelor ale SEE. Sunt obținute formulele de corelare între schemele echivalente ale unui transformator cu două înfășurări în formă de T, Γ și Π și parametrii fundamentali ai cuadripolului. Algoritmii dezvoltați pentru amplasarea optimă a PMU-urilor pot fi utilizați atât pentru a determina numărul minim de noduri pentru amplasarea dispozitivelor MFS, cât și pentru a crește viteza și calitatea calculului regimului permanent de funcționare și a evaluării stării statice într-un sistem electroenergetic.

Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere.

1. Metode de identificare ale parametrilor liniilor electrice, bazate pe tehnologia MFS efectuate în unu sau două regimuri de funcționare sunt dezvoltate pentru diferite forme de reprezentare a schemei echivalente a liniilor electrice (cu parametrii distribuiți și concentrați).
2. Pentru diferite forme de reprezentare a schemei echivalente a transformatoarelor de putere cu rapoarte de transformare reale sau complexe au fost elaborate metode de identificare a parametrilor transformatoarelor cu două și trei înfășurări pe baza măsurătorilor fazoriale sincronizate.
3. Prin utilizarea metodei tensiunilor nodale determinante s-au elaborat algoritmi pentru amplasarea optimă a PMU-urilor în nodurile SEE ce asigură observabilitatea rețelei cu

un număr minim de dispozitive instalate în nodurile SEE.

4. Utilizarea unei matrice a admitanțelor nodale de structura specială, în cadrul calculului în regim permanent de funcționare, cu utilizarea combinată a datelor din dispozitivele PMU și SCADA poate reduce și facilita în mod semnificativ calculul regimului permanent de funcționare, precum și procesul de evaluare a stării statice a SEE.

Implementarea rezultatelor științifice. Rezultatele cercetării pot fi utilizate de operatorii de rețea pentru a crea modele activ-adaptative ale SEE, pentru a crea metodologii de diagnosticare a echipamentelor în timpul funcționării, pentru a determina numărul minim de PMU-uri instalate în rețele de diferite clase de tensiune, cu condiția ca observabilitatea deplină a SEE este asigurată, pentru a efectua calcule accelerate ale regimului permanent de funcționare și pentru a simplifica procesului de evaluare a stării statice atunci când se utilizează împreună măsurători ale PMU și SCADA.

Aprobarea lucrării. Rezultatele obținute în cadrul tezei au fost prezentate și discutate în cadrul conferințelor și forumurilor de nivel național și internațional, în total 7. Rezultatele obținute sunt publicate în 8 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: măsurări fazoriale sincronizate, modele matematice, parametrii schemei echivalente, linie electrică, transformator de putere, observabilitatea rețelei electrice, calcul regimului permanent de funcționare, estimarea stării statice.

CONȚINUTUL TEZEI

În **Introducere** sunt prezentate actualitatea și importanța temei abordate, noutatea științifică a lucrării, valoarea teoretică și aplicativă a rezultatelor obținute; este indicat scopul și sunt formulate obiectivele de cercetare.

În **primul capitol** se demonstrează că modelele matematice ale elementelor rețelei electrice joacă un rol primordial în problemele de gestiune a regimului de funcționare. Modelarea matematică se realizează prin rezolvarea unor probleme directe și inverse. Sarcina directă presupune efectuarea cercetărilor asupra modelului pentru a extrage cunoștințe utile, cu condiția cunoașterii structurii și parametrilor modelului. Problema inversă constă în construirea modelelor matematice pe baza rezultatelor încercărilor privind comportamentul obiectului modelat. Compartimentul de modelare care rezolvă problema inversă se numește identificarea [2].

Problema de identificare este divizată în 2 componente: determinarea structurii (identificarea structurală) și determinarea parametrilor (identificarea parametrică). În primul caz, un obiect (element de sistem, obiect de control, element de proces tehnologic etc.) este supus unor influențe externe, se analizează reacțiile sale și se obține un model matematic (descrierea structurii și parametrilor acestuia). În identificarea parametrică a obiectelor se rezolvă problema determinării parametrilor cu o structură cunoscută anterior a modelului matematic al obiectului [3]. Problemelor de identificare parametrică li se acordă o atenție deosebită în cadrul acestui studiu.

În prezent, parametrii schemelor echivalente, de regulă, se determină folosind date de catalog și de referință. Pe parcursul duratei de viață a echipamentului, se consideră că acești parametri nu se modifică. La rândul său, o analiză a cercetărilor din domeniul studierii naturii modificărilor parametrilor pasivi și a cauzelor erorilor a arătat că parametrii pasivi ai schemelor echivalente depind de mulți factori și se pot modifica sub influența lor în limite semnificative pe parcursul funcționării.

Principalele motive care afectează acuratețea determinării parametrilor pasivi ai liniilor electrice sunt utilizarea schemelor echivalente simplificate, abaterile tehnologice ale parametrilor, precum și modificările condițiilor meteorologice externe și cauzele de altă natură.

În tabelul 1 se prezintă valorile erorilor ale parametrilor liniei electrice și principalele motive pentru apariția lor.

De asemenea, trebuie de menționat că există inexactitate care apare la reprezentarea transformatoarelor de putere în orice formă de prezentare a schemei echivalente. Cea mai precisă este schema echivalentă în formă de T, iar cea mai frecvent utilizată schemă echivalentă în formă de Γ nu ține cont de faptul că curentul de mers în gol curge prin înfășurarea primară.

Tabelul 1. Erori în calculul parametrilor pasivi ai schemei echivalente pentru LEA [4]

Cauza	Eroare maximală, în %			
	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
1. Efectul pelicular	+(1-3)	-	+1	-
2. Modificările temperaturii	±16	-	-	+(2-3)
3. Factori meteorologici	+20	±3	+(4-40)	+(3-20)
4. Elemente tehnologice	±1	±(2-3)	±11	±1
5. Conductoare pe protecție	+1	+(2-3)	-	±(1-9)
6. Conductivitatea pământului	-	±3	-	-
7. Transpunerea fazelor	-	±6	-	+(2-4)
8. LEA paralele	-	-(4-6)	-	+(3-4)
9. Simplificarea schemei echivalente	-	-	-(5-6)	-
10. Modificarea frecvenței	-	±0,5	-	±0,5
11. Lungimea tronsonului	±(0,8-1)	±(0,8-1)	-	-
12. Neliniaritatea caracteristicilor	-	-	±(8-20)	-
13. Toleranțe de instalare în construcție	-	±0,5	-	±(2-4)
14. Alte surse	-	±1	±(2-3)	±0,7
15. Eroarea maximă totală, %	-16..+20	-10..+8	-20..+40	-4..+20

În tabelul 2 se prezintă cauzele și mărimile erorilor ale parametrilor pasivi ai schemelor echivalente pentru transformatoare.

Tabelul 2. Erori la calculul parametrilor schemelor echivalente ale transformatoarelor [4]

Cauza	Eroare maximală, în %			
	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
1. Simplificarea schemei echivalente	-	±2	±2	±4
2. Toleranțe constructive	+(10-20)	±10	+15	±30
3. Modificările temperaturii	+12	-	-	-
4. Neliniaritatea caracteristicilor	-	-	±(9-12)	+45
5. Reglarea tensiunii sub sarcină	±16	±11	-	-
6. Uzură	-	-	+15	-
7. Eroarea maximă totală, %	-16..+20	-15..+15	-12..+24	-15..+45

Modificări ale parametrilor schemelor echivalente ale liniilor aeriene și transformatoarelor de putere, ca elemente principale și cele mai răspândite ale SEE, duc la inexactități la calcularea curenților de scurtcircuit, determinarea locațiilor de defect, setarea reglajelor de protecție prin relee și automatizării de urgență.

Conceptul tradițional de întocmire a schemelor echivalente nu reflectă modificările parametrilor și obiectelor analizate în timpul funcționării. În consecință, valorile calculate ale curenților și tensiunilor în regim normal și de avarie diferă semnificativ de valorile măsurate. Acest lucru se întâmplă din cauza lipsei unui feedback între obiecte și modelele lor matematice, ceea ce nu permite reflectarea modificărilor ale parametrilor pasivi ai elementelor SEE pe parcursul funcționării acestora. Astfel, este demonstrat că pe parcursul funcționării, parametrii pasivi ai elementelor SEE trebuie să fie actualizați. Costurile economice mari și imposibilitatea deconectării de la rețea explică imposibilitatea de a efectua experimente fizice asupra elementelor în regim de

funcționare ale rețelei pentru actualizarea parametrilor acestora. Prin urmare, metodele de actualizare a parametrilor liniilor electrice și transformatoarelor de putere pe parcursul funcționării lor devin deosebit de actuali și necesari.

Din acest motiv, sunt implementate metode de identificare a parametrilor elementelor de rețea în timp real. Un grad ridicat de automatizare a procesului tehnologic, îmbunătățirea sistemului de măsurare și apariția măsurătorilor fazoriale sincronizate oferă oportunitatea tehnică de a efectua identificarea parametrilor în mod automat, fără a interfera cu procesul tehnologic de funcționare a echipamentului, precum și de a genera automat baze de date cu parametrii echipamentelor fără participarea operatorului.

Tehnologia MFS are 2 caracteristici cheie [5]. În primul rând, măsurarea parametrilor de regim se realizează cu legare la un semnal de timp exact de înaltă precizie, deoarece rezultatele măsurării sunt convertiți în formă digitală și furnizați cu un marcaj de timp UTC. Precizia sincronizării timpului este de micro- și nanosecunde. În centrul de colectare a informațiilor, există posibilitatea de comparare a tuturor măsurărilor cu același marcaj de timp și astfel se obține o imagine instantanee a parametrilor regimului de funcționare al SEE în orice moment de timp. În sistemele tradiționale de telecontrol și SCADA, acuratețea sincronizării timpului variază de la 0,1 la 4 s, ceea ce duce la o decalare imprevizibilă a timpului între marcajele de măsurare realizate la diferite stații electrice și face dificilă compararea rezultatelor obținute pentru diferite noduri ale SEE. În al doilea rând, măsurătorile sunt fazoriale, adică nu sunt măsurate doar valorile efective ale curenților și tensiunilor, ci și unghiurile de defazaj ale acestora.

Conform soluției arhitecturale standard [6], sistemul MFS constă din mai multe unități de măsurare fazorială sincronizată (PMU) situate în nodurile SEE și concentratoare de măsurare fazorială (PDC), unde va fi efectuată prelucrarea ulterioară a datelor. În plus, dacă PMU-urile sunt integrate în dispozitive electronice inteligente care îndeplinesc direct și alte funcții (protecție prin rele și terminale de automatizare), se recomandă amplasarea concentratorului direct stație electrică. În general, conform recomandărilor producătorilor de echipamente tip MFS, concentratoare de măsurări fazoriale ar trebui instalate la fiecare nivel al arhitecturii ierarhice unde pot apare solicitări de utilizare a pachetelor de date de măsurare fazorială de către aplicații terțe.

Efectul introducerii tehnologiei MFS este exprimat în [7]:

- îmbunătățirea calității suportului informatic pentru personalul operațional și de dispecerat în gestionarea regimului de funcționare al SEE;
- creșterea acurateții calculelor regimului permanent de funcționare pe baza modelelor matematice verificate ale echipamentului electric și a sistemului electroenergetic;
- creșterea stabilității funcționării echipamentelor generatoare, asociată cu detectarea și

amortizarea în timp util a oscilațiilor de joasă frecvență, determinarea funcționării corecte și setarea controlului automat al excitației generatorului;

- reducerea numărului de încălcări tehnologice în SEE, care apar ca urmare a încălcării stabilității statice sau dinamice, în identificarea și evaluarea în timp util a consecințelor creșterii încărcării regimului de funcționare al SEE;

- creșterea preciziei controlului de urgență datorită utilizării unghiurilor de defazaj ale tensiunii în algoritmi de funcționare ai automatizării de urgență.

În cadrul reconstrucției circuitelor de protecție prin rele și contorizare cu sprijinul financiar al USAID și USEA, până în 2025, la stațiile electrice principale ale SEE din Republica Moldova vor fi instalate PMU-rile sincronizate cu GPS, ce vor asigura măsurarea tensiunii și frecvenței în noduri, precum și a curenților liniilor incidente. Datele de la PMU-rile vor fi expediate la centrul de control al Întreprinderii de Stat „Moldelectrica” și utilizate în diverse aplicații, inclusiv evaluarea stării statice, calculul capacității de transport a liniilor electrice în timp real, analiza stabilității statice și dinamice.

În sistemul energetic moldovenesc, există în prezent un grad ridicat de uzură fizică și morală a echipamentelor centralelor și stațiilor electrice (mai mult de 60% au o durată de viață de peste 30 de ani) și a liniilor de înaltă tensiune din rețelele de transport ale Republicii Moldova. (67,5% sunt în funcțiune de peste 40 de ani) [8]. Din acest motiv, instrumentele de evaluare a parametrilor schemelor echivalente pe baza datelor MFS vor avea un mare rol practic, permițând identificarea preventivă a defectelor și defecțiunilor liniilor electrice și transformatoarelor, precum și crearea unor modele matematice adecvate ale acestor elemente din rețea. Aspecte atât de importante precum sincronizarea sistemelor electrice de energie ale Ucrainei și Republicii Moldova cu Sistemul Energetic Continental European ENTSO-E în martie 2022, precum și stimularea dezvoltării surselor regenerabile de energie accelerează procesele de implementare și dezvoltare a tehnologiilor MFS în Republica Moldova.

În **al doilea capitol**, pe baza unei analize a cercetărilor în domeniul identificării parametrilor pasivi ai elementelor SEE, precum și ținând cont de propriile studii, pentru prima dată s-a realizat clasificarea metodelor existente de identificare a parametrilor pasivi ai schemelor echivalente pentru liniile electrice și transformatoarele de putere.

Pentru identificarea parametrilor pasivi, sunt folosite modele clasice ale liniilor electrice cu parametri concentrați (Fig. 1 (a)) sau cu parametri distribuiți (Fig. 1 (b)). În acest caz, o trăsătură distinctivă a metodelor propuse este utilizarea măsurătorilor fazoriale ale tensiunilor și curenților la capetele liniei, obținute sincron în unul sau două regimuri de funcționare ale liniei.

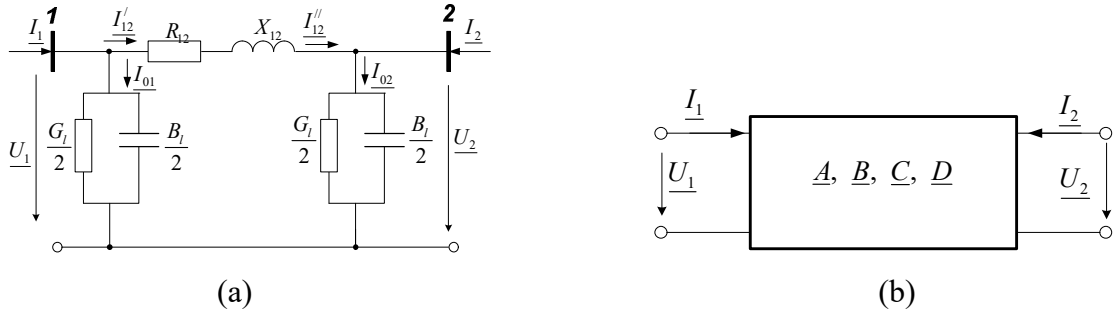


Fig. 1. Schema echivalentă a LEA (a) în forma de Π ; (b) în forma de cuadripol

Atunci când pentru liniile electrice se utilizează schema echivalentă în formă de Π , se propune utilizarea metodei bilanțului curenților la noduri pentru a calcula parametrii longitudinali și transversali:

- conform datelor măsurărilor realizate într-un singur regim:

$$\begin{cases} I_{1a} = -G_{21}U_2 \cos \delta_2 - B_{21}U_2 \sin \delta_2 + G_{22}U_1; \\ I_{1r} = -B_{21}U_2 \cos \delta_2 + G_{21}U_2 \sin \delta_2 + B_{22}U_1; \\ I_{2a} = G_{21}U_1 \cos \delta_2 - B_{21}U_1 \sin \delta_2 - G_{22}U_2; \\ I_{2r} = B_{21}U_1 \cos \delta_2 + G_{21}U_1 \sin \delta_2 - B_{22}U_2. \end{cases} \quad (1)$$

- conform datelor măsurărilor realizate în două regimuri de funcționare:

$$\begin{cases} I_{2a}^{(1)} = G_{21}U_1^{(1)} \cos \delta_2^{(1)} - B_{21}U_1^{(1)} \sin \delta_2^{(1)} - G_{22}U_2^{(1)}; \\ I_{2a}^{(2)} = G_{21}U_1^{(2)} \cos \delta_2^{(2)} - B_{21}U_1^{(2)} \sin \delta_2^{(2)} - G_{22}U_2^{(2)}; \\ I_{2r}^{(1)} = B_{21}U_1^{(1)} \cos \delta_2^{(1)} + G_{21}U_1^{(1)} \sin \delta_2^{(1)} + B_{22}U_2^{(1)}; \\ I_{2r}^{(2)} = B_{21}U_1^{(2)} \cos \delta_2^{(2)} + G_{21}U_1^{(2)} \sin \delta_2^{(2)} - B_{22}U_2^{(2)}. \end{cases} \quad (2)$$

Dacă există date sincronizate despre valorile puterii la capetele liniei, se propune utilizarea metodei bilanțului puterilor la noduri:

- conform datelor măsurărilor realizate într-un singur regim:

$$\begin{cases} P_1 = -G_{21}U_1U_2 \cos \delta_2 - B_{21}U_1U_2 \sin \delta_2 + G_{22}U_1^2; \\ Q_1 = -B_{21}U_1U_2 \cos \delta_2 + G_{21}U_1U_2 \sin \delta_2 + B_{22}U_1^2; \\ P_2 = G_{21}U_1U_2 \cos \delta_2 - B_{21}U_1U_2 \sin \delta_2 - G_{22}U_2^2; \\ Q_2 = B_{21}U_1U_2 \cos \delta_2 + G_{21}U_1U_2 \sin \delta_2 - B_{22}U_2^2; \end{cases} \quad (3)$$

- conform datelor măsurărilor realizate în două regimuri de funcționare:

$$\begin{cases} P_2^{(1)} = G_{21}U_1^{(1)}U_2^{(1)} \cos \delta_2^{(1)} - B_{21}U_1^{(1)}U_2^{(1)} \sin \delta_2^{(1)} - G_{22} \left(U_2^{(1)} \right)^2; \\ P_2^{(2)} = G_{21}U_1^{(2)}U_2^{(2)} \cos \delta_2^{(2)} - B_{21}U_1^{(2)}U_2^{(2)} \sin \delta_2^{(2)} - G_{22} \left(U_2^{(2)} \right)^2; \\ Q_2^{(1)} = B_{21}U_1^{(1)}U_2^{(1)} \cos \delta_2^{(1)} + G_{21}U_1^{(1)}U_2^{(1)} \sin \delta_2^{(1)} + B_{22} \left(U_2^{(1)} \right)^2; \\ Q_2^{(2)} = B_{21}U_1^{(2)}U_2^{(2)} \cos \delta_2^{(2)} + G_{21}U_1^{(2)}U_2^{(2)} \sin \delta_2^{(2)} - B_{22} \left(U_2^{(2)} \right)^2. \end{cases} \quad (4)$$

Prin rezolvarea sistemelor de ecuații (1)-(4) se determină valorile admitanțelor

longitudinale și transversale. Cunoscând conductanțele active G_{22} și G_{21} , precum și susceptanțele capacitive B_{22} și B_{21} , se determină:

$$\frac{G_l}{2} = G_{22} - G_{21}; \quad \frac{B_l}{2} = B_{21} - B_{22}. \quad (5)$$

Cunoscând G_{12} și B_{12} se poate de determinat parametrii ramurii longitudinale R_{12} și X_{12} :

$$R_{12} = \frac{G_{12}}{G_{12}^2 + B_{12}^2}; \quad X_{12} = \frac{B_{12}}{G_{12}^2 + B_{12}^2}. \quad (6)$$

În cazul utilizării unei scheme echivalente ale unei linii electrice cu parametrii distribuți sub forma unui cuadripol pasiv, se presupune că coeficienții cuadripolului sunt calculați folosind formulele derivate pentru caz

- de utilizare a măsurărilor, realizate într-un singur regim:

$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_1^2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_1}{\underline{U}_2^2 \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2}; \quad \underline{B} = \frac{\underline{U}_1^2 \cdot \underline{U}_2 - \underline{U}_2^3}{\underline{U}_2^2 \cdot \underline{I}_1 \cdot \sqrt{3} + \underline{U}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2 \cdot \sqrt{3}}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{U}_2 \cdot \underline{I}_1^2 \cdot \sqrt{3} - \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^2 \cdot \sqrt{3}}{\underline{U}_2^2 \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2} \quad (7)$$

- de utilizare a măsurărilor, realizate în două regimuri de funcționare:

$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_1^{(1)} \cdot \underline{I}_2^{(2)} - \underline{U}_1^{(2)} \cdot \underline{I}_2^{(1)}}{\underline{U}_2^{(1)} \cdot \underline{I}_2^{(2)} - \underline{U}_2^{(2)} \cdot \underline{I}_2^{(1)}}; \quad \underline{B} = \frac{\underline{U}_1^{(1)} - \underline{A} \cdot \underline{U}_2^{(1)}}{\sqrt{3} \cdot \underline{I}_2^{(1)}} = \frac{\underline{U}_1^{(2)} - \underline{A} \cdot \underline{U}_2^{(2)}}{\sqrt{3} \cdot \underline{I}_2^{(2)}}; \quad (8)$$

$$\underline{C} = \frac{\sqrt{3} \cdot (\underline{I}_1^{(1)} \cdot \underline{I}_2^{(1)} - \underline{I}_1^{(2)} \cdot \underline{I}_2^{(1)})}{\underline{U}_2^{(1)} \cdot \underline{I}_2^{(2)} - \underline{U}_2^{(2)} \cdot \underline{I}_2^{(1)}}.$$

În continuare, parametrii ramurilor longitudinale și transversale ale liniei electrice sunt determinați folosind formulele:

$$\underline{Z}_{12} = R_{12} + jX_{12} = \underline{B}; \quad \underline{Y}_{12} = G_{12} - jB_{12} = 2 \cdot \frac{\underline{A} - 1}{\underline{B}}. \quad (9)$$

În tabelul 3 sunt prezentate rezultatele obținute pentru parametrii schemei echivalente a unei linii de transport de 110 kV cu lungimea de 100 km, realizată cu conductor marca AC-185/43, cu dispunerea orizontală a conductoarelor de fază la o distanță de 5 m, cu diferiți factori de încărcare a liniei (k_i).

Tabelul 3. Compararea rezultatelor determinării parametrilor prin diferite metode pentru LEA de 110 kV

Metoda aplicată	k_i	Parametru determinat		
		R, Ω	X, Ω	B, μS
Parametrii reali	-	15,6	41,4	282
Bilanțul puterilor (cu date dintr-un regim)	1	15,6	41,4	282
Bilanțul puterilor (cu date din două regimuri)	1/0,9	15,601	41,4	282,08
Bilanțul curenților (cu date dintr-un regim)	1	15,6	41,4	281,(9)
Bilanțul curenților (cu date din două regimuri)	1/0,9	15,601	41,4	282,08
Cuadripol (cu date dintr-un regim)	1	15,6	41,4	282
Cuadripol (cu date din două regimuri)	1/0,9	15,6	41,4	282

Pentru transformatoarele cu două înfășurări, este posibil să se utilizeze schemele echivalente în formă de Γ , Π și T (Fig. 2 (a), (b), (c) respectiv). De asemenea, pentru a determina parametrii pasivi ai transformatorului, se propune utilizarea unui cuadripol activ (Fig. 2 (d)).

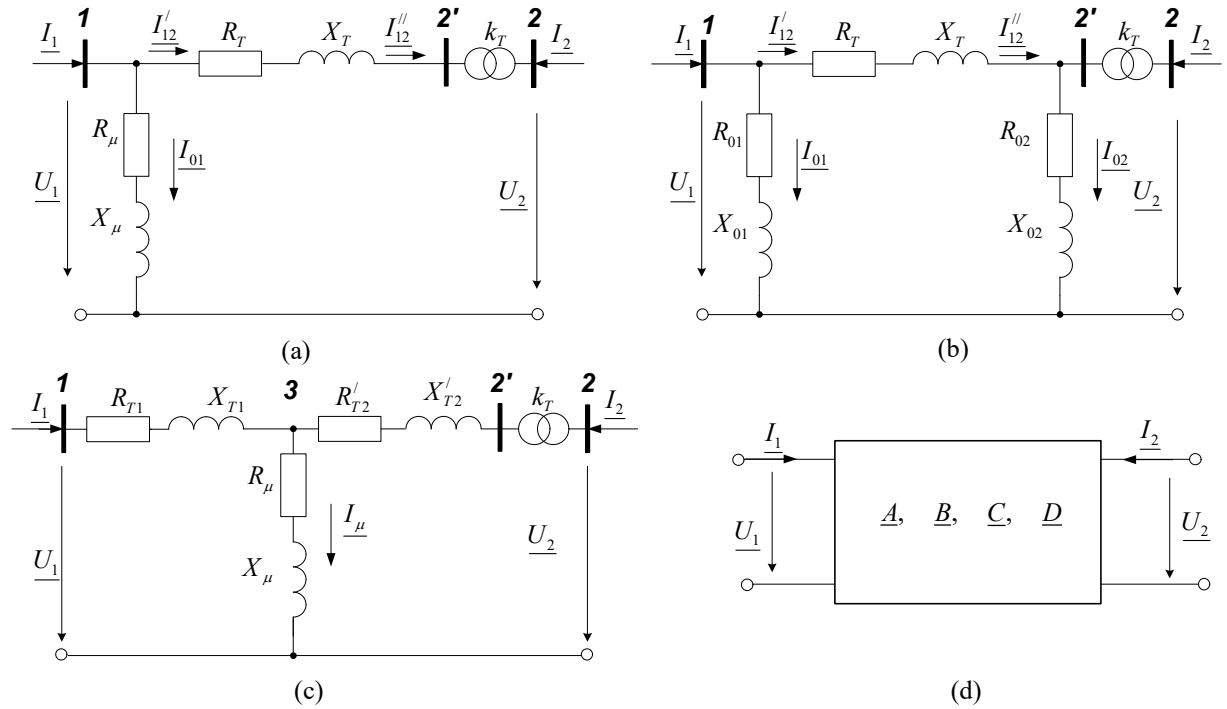


Fig. 2. Prezentarea transformatorului cu două înfășurări (a) cu schema echivalentă în forma Γ ; (b) cu schema echivalentă în forma Π ; (c) cu schema echivalentă în forma T; (d) în forma de cuadripol.

Pentru o schemă echivalentă în formă de Γ , se obțin expresii pentru calcularea parametrilor folosind metoda bilanțului curenților la noduri:

$$\begin{cases} J_{a1}^{(1)} = U_1^{(1)} G_{t\mu} - k_t^{(1)} U_2^{(1)} G_t \cdot \cos \delta_2^{(1)} - k_t^{(1)} U_2^{(1)} B_t \sin \delta_2^{(1)}; \\ J_{r1}^{(1)} = U_1^{(1)} B_{t\mu} + k_t^{(1)} U_2^{(1)} G_t \cdot \sin \delta_2^{(1)} - k_t^{(1)} U_2^{(1)} B_t \cos \delta_2^{(1)}; \\ J_{a1}^{(2)} = U_1^{(2)} G_{t\mu} - k_t^{(2)} U_2^{(2)} G_t \cdot \cos \delta_2^{(2)} - k_t^{(2)} U_2^{(2)} B_t \sin \delta_2^{(2)}; \\ J_{r1}^{(2)} = U_1^{(2)} B_{t\mu} + k_t^{(2)} U_2^{(2)} G_t \cdot \sin \delta_2^{(2)} - k_t^{(2)} U_2^{(2)} B_t \cos \delta_2^{(2)}. \end{cases} \quad (10)$$

sau folosind metoda bilanțului puterilor la noduri:

$$\begin{cases} P^{(1)} = U_1^{2(1)} G_{t\mu} - k_t^{(1)} U_1^{(1)} U_2^{(1)} G_t \cdot \cos \delta_2^{(1)} - k_t^{(1)} U_1^{(1)} U_2^{(1)} B_t \sin \delta_2^{(1)}; \\ Q^{(1)} = U_1^{2(1)} B_{t\mu} + k_t^{(1)} U_1^{(1)} U_2^{(1)} G_t \cdot \sin \delta_2^{(1)} - k_t^{(1)} U_1^{(1)} U_2^{(1)} B_t \cos \delta_2^{(1)}; \\ P^{(2)} = U_1^{2(2)} G_{t\mu} - k_t^{(2)} U_1^{(2)} U_2^{(2)} G_t \cdot \cos \delta_2^{(2)} - k_t^{(2)} U_1^{(2)} U_2^{(2)} B_t \sin \delta_2^{(2)}; \\ Q^{(2)} = U_1^{2(2)} B_{t\mu} + k_t^{(2)} U_1^{(2)} U_2^{(2)} G_t \cdot \sin \delta_2^{(2)} - k_t^{(2)} U_1^{(2)} U_2^{(2)} B_t \cos \delta_2^{(2)}, \end{cases} \quad (11)$$

și de asemenea prin metoda cuadripolului:

$$\begin{cases} \underline{U}_1^{(1)} = \underline{U}_2^{(1)} \cdot \underline{A} + \sqrt{3} \cdot \underline{J}_2^{(1)} \underline{B}; \\ \underline{J}_1^{(1)} = \frac{\underline{U}_2^{(1)}}{\sqrt{3}} \cdot \underline{C} + \underline{J}_2^{(1)} \underline{D}; \\ \underline{U}_1^{(2)} = \underline{U}_2^{(2)} \cdot \underline{A} + \sqrt{3} \cdot \underline{J}_2^{(2)} \underline{B}; \\ \underline{J}_1^{(2)} = \frac{\underline{U}_2^{(2)}}{\sqrt{3}} \cdot \underline{C} + \underline{J}_2^{(2)} \underline{D}. \end{cases} \quad (12)$$

Au fost obținute și expresii pentru calcularea parametrilor schemelor echivalente în formă de Γ , Π și T ale transformatoarelor cu două înfășurări atunci când acestea sunt reprezentate sub forma unui cuadripol activ (Tabelul 4).

Tabelul 4. Expresii pentru determinarea parametrilor pasivi ai transformatoarelor cu două înfășurări cu schemele echivalente prezentate în forma de Γ , Π și T

schema echivalentă în forma Γ		
$\underline{a} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \underline{J}_1 \underline{k}_t^* + \underline{U}_2 \cdot \underline{J}_2 \cdot \underline{k}_t - \underline{k}_t ^2 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{J}_1}{\underline{J}_2 \cdot \underline{U}_1}$	$\underline{A} = \underline{k}_t$	$\underline{B} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{k}_t \cdot \underline{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \underline{J}_2}$
$\underline{C} = \frac{\left(\underline{k}_t^* \cdot \underline{J}_2 - \underline{k}_t ^2 \cdot \underline{J}_1 \right) \cdot \sqrt{3}}{\underline{U}_1 \cdot \underline{k}_t^*}$	$\underline{D} = \frac{1}{\underline{k}_t^*} \cdot \underline{a}$	$\underline{Z}_t = \underline{B} \cdot \underline{k}_t^*$ $\underline{Z}_\mu = \frac{\underline{a} - 1}{\underline{Z}_t}$
schema echivalentă în forma Π		
$\underline{a} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \underline{J}_1 \underline{k}_t^* + \underline{U}_2 \cdot \underline{J}_2 \cdot \underline{k}_t}{\underline{J}_2 \cdot \underline{U}_1 + \underline{k}_t ^2 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{J}_1}$	$\underline{A} = \underline{a} \cdot \underline{k}_t$	$\underline{B} = \frac{\underline{U}_1^2 - \underline{k}_t^2 \cdot \underline{U}_2^2}{\sqrt{3} \cdot \left(\underline{J}_2 \cdot \underline{U}_1 + \underline{J}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{k}_t ^2 \right)}$
$\underline{C} = \frac{\left(\left(\underline{k}_t^* \right)^2 \cdot \underline{J}_1^2 - \underline{J}_2^2 \right) \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{k}_t}{\left(\underline{J}_2 \cdot \underline{U}_1 + \underline{J}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{k}_t ^2 \right) \cdot \underline{k}_t^*}$	$\underline{D} = \frac{1}{\underline{k}_t^*} \cdot \underline{a}$	$\underline{Z}_t = \underline{B} \cdot \underline{k}_t^*$ $\underline{Z}_0 = 2 \cdot \underline{Z}_{01} = 2 \cdot \underline{Z}_{02} = \frac{\underline{a} - 1}{2 \cdot \underline{Z}_t}$
schema echivalentă în forma T		
$\underline{a} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \underline{J}_1 \underline{k}_t^* + \underline{U}_2 \cdot \underline{J}_2 \cdot \underline{k}_t}{\underline{J}_2 \cdot \underline{U}_1 + \underline{k}_t ^2 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{J}_1}$	$\underline{A} = \underline{a} \cdot \underline{k}_t$	$\underline{B} = \frac{\underline{U}_1^2 - \underline{k}_t^2 \cdot \underline{U}_2^2}{\sqrt{3} \cdot \left(\underline{J}_2 \cdot \underline{U}_1 + \underline{J}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{k}_t ^2 \right)}$

$\underline{C} = \frac{\left(\left(\underline{k}_t \right)^* \cdot \underline{J}_1^2 - \underline{J}_2^2 \right) \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{k}_t}{\left(\underline{J}_2 \cdot \underline{U}_1 + \underline{J}_1 \cdot \underline{U}_2 \cdot \left \underline{k}_t \right ^2 \right) \cdot \underline{k}_t^*}$	$\underline{D} = \frac{1}{\underline{k}_t} \cdot \underline{a}$	$\underline{Y}_\mu = \frac{\underline{C}}{\underline{k}_t}$ $\underline{Z}_t = \frac{2 \cdot (\underline{a} - 1)}{\underline{Y}_\mu}$
--	---	---

Metodele prezentate de expresiile tabelului 4 pot fi utilizate pentru a calcula parametrii pasivi ai transformatoarelor cu două înfășurări cu o valoare complexă sau reală a raportului de transformare. În acest caz, este posibilă calcularea parametrilor pasivi ai unui transformator cu două înfășurări atunci când se utilizează schema echivalentă în formă de Γ , Π și T, prin calcularea coeficienților unui cuadripol folosind un singur regim de măsurare.

Pentru a identifica parametrii pasivi ai transformatoarelor cu trei înfășurări și autotransformatoarelor, se propune utilizarea schemelor echivalente simplificate prezentate în Fig. 3.

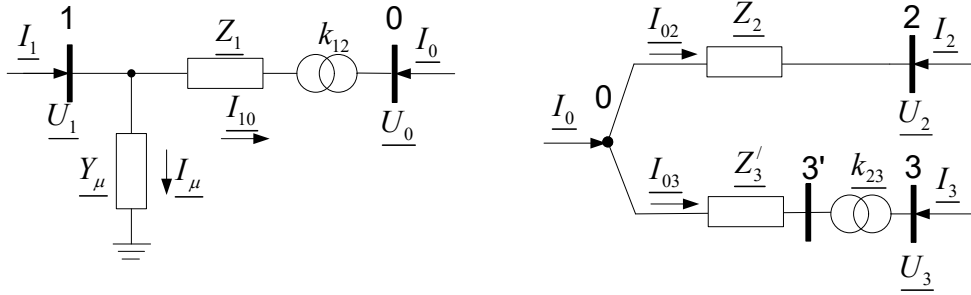


Fig. 3. Schema echivalentă simplificată a unui transformator cu trei înfășurări

Ținând cont de faptul că $R_1=R_2=R_3$, iar $X_2=0$ pentru transformatoarele cu trei înfășurări este format un sistem de opt ecuații cu opt necunoscute:

$$\left\{ \begin{array}{l} -J'_1 + G_\mu \frac{U_1}{\sqrt{3}} + \frac{J'_2}{k_{12}} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} J'_3 - \frac{1}{2} J''_3 \right) \frac{1}{k_{13}} = 0; \\ -J''_1 - B_\mu \frac{U_1}{\sqrt{3}} + \frac{J''_2}{k_{12}} + \left(\frac{1}{2} J'_3 + \frac{1}{2} J''_3 \right) \frac{1}{k_{13}} = 0; \\ U_1 - 2\sqrt{3} J'_2 \frac{R_1}{k_{12}} + \sqrt{3} J''_2 \frac{X_1}{k_{12}} - \left(\frac{3}{2} J'_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} J''_3 \right) \frac{R_1}{k_{13}} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} J'_3 + \frac{3}{2} J''_3 \right) \frac{X_1}{k_{13}} - U'_2 k_{12} = 0; \\ -\sqrt{3} J'_2 \frac{X_1}{k_{12}} - 2\sqrt{3} J''_2 \frac{R_1}{k_{12}} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} J'_3 + \frac{3}{2} J''_3 \right) \frac{R_1}{k_{13}} - \left(\frac{3}{2} J'_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} J''_3 \right) \frac{X_1}{k_{13}} - U''_2 k_{12} = 0; \\ U'_2 k_{12} + \sqrt{3} J'_2 \frac{R_1}{k_{12}} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} U'_3 - \frac{1}{2} U''_3 \right) k_{13} - \left(\frac{3}{2} J'_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} J''_3 \right) \frac{R_1}{k_{13}} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} J'_3 - \frac{3}{2} J''_3 \right) \frac{X_3}{k_{13}} = 0; \\ U''_2 k_{12} + \sqrt{3} J''_2 \frac{R_1}{k_{12}} - \left(\frac{1}{2} U'_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} U''_3 \right) k_{13} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} J'_3 + \frac{3}{2} J''_3 \right) \frac{R_1}{k_{13}} - \left(\frac{3}{2} J'_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} J''_3 \right) \frac{X_3}{k_{13}} = 0; \\ P_1 - P_2 - P_3 - G_\mu U_1^2 - 3J_1^2 R_1 + \frac{6}{\sqrt{3}} J'_1 U_1 R_1 G_\mu - \frac{6}{\sqrt{3}} J''_1 U_1 R_1 B_\mu - U_1^2 R_1 G_\mu^2 - U_1^2 R_1 B_\mu^2 - 3 \frac{J_2^2}{k_{12}^2} R_1 - 3 \frac{J_3^2}{k_{13}^2} R_1 = 0; \\ Q_1 - Q_2 - Q_3 - B_\mu U_1^2 - 3J_1^2 X_1 + \frac{6}{\sqrt{3}} J'_1 U_1 X_1 G_\mu - \frac{6}{\sqrt{3}} J''_1 U_1 X_1 B_\mu - U_1^2 X_1 G_\mu^2 - U_1^2 X_1 B_\mu^2 - 3 \frac{J_2^2}{k_{12}^2} X_3 = 0. \end{array} \right. \quad (13)$$

Rezultatele determinării parametrilor folosind aceste metode sunt comparate cu datele reale

(de catalog) ale liniilor aeriene și transformatoarelor de putere cu două și trei înfășurări, s-au obținut rezultate bune, ce confirmă veridicitatea metodelor propuse.

Al treilea capitol explică faptul că din punct de vedere tehnic și economic nu este eficient să se instaleze dispozitive PMU în fiecare nod al rețelei electrice analizate, întrucât este posibil să se realizeze observabilitatea rețelei cu mai puține puncte în care sunt instalate dispozitivelor PMU. Un sistem este observabil atunci când variabilele sale de stare pot fi determinate dintr-un set de informații disponibile [9]. Problema amplasării optime a PMU-rilor implică determinarea numărului minim de PMU-uri și a locațiilor de instalare a lor, asigurând în același timp observabilitatea completă a SEE.

În lucrare se propune o nouă abordare pentru amplasarea optimă a PMU-urilor bazată pe metoda tensiunilor nodale determinate [10, 11]. Sistemul de ecuații nodale, se poate scrie sub formă matricială după cum urmează [12, 13]:

$$[\underline{Y}_n]_{trans} \cdot [\underline{U}_n] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{pp} & \underline{Y}_{pq} \\ \underline{Y}_{qp} & \underline{Y}_{qq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J}_p \\ \underline{J}_q \end{bmatrix}, \quad (14)$$

unde $[\underline{Y}_n]_{trans}$ - matricea admitanțelor nodale transfigurată;

$[\underline{U}_n]$ - matricea tensiunilor nodale pentru toate nodurile rețelei electrice, determinate față de neutrul rețelei.

Trecerea de la matricea admitanțelor nodale $[\underline{Y}_n]$ ce corespunde numerotării inițiale a nodurilor rețelei electrice, la matricea $[\underline{Y}_n]_{trans}$ se realizează prin schimbarea unor linii și coloane ghidată de următoarele reguli:

- în matricea admitanțelor nodale $[\underline{Y}_n]$ se pot schimba cu locurile oricare două linii i și k cu modificarea simultană a componentelor matricei $[\underline{J}_n]$;
- în matricea admitanțelor nodale $[\underline{Y}_n]$ se pot schimba cu locurile oricare două coloane s și r cu modificarea simultană a componentelor $[\underline{U}_n]$.

Întrucât submatricea $[\underline{Y}_{qq}]$ este de o structură specială și dacă sunt cunoscute elementele din matricea coloană $[\underline{U}_p]$, foarte rapid se pot determina elementele submatricei $[\underline{U}_q]$ adică variabilele necunoscute.

În privința procesului de împărțire a matricei admitanțelor nodale în submatrici, se impun următoarele cerințe:

- pentru a reduce costurile de investiții pentru instalarea PMU-rilor, rangul submatricei $[\underline{Y}_{qq}]$ să fie maxim;
- pentru a simplifica semnificativ calculul stării statice a rețelei electrice, în majoritatea cazurilor, atunci când este posibil, este necesar să se utilizeze ecuații liniare pentru determinarea

variabilelor necunoscute. Pentru a face acest lucru, este necesar să fie mutate (dacă este posibil) elementele din diagonala principală a matricei $[Y_{\Sigma}]$.

În această lucrare, sunt propuși doi algoritmi noi pentru determinarea amplasării optime a dispozitivelor PMU, pe baza principiului împărțirii matricei admitanțelor nodale în submatrici (algoritmi A1 și A2). Diferențele constau în faptul că algoritmul A1 presupune că dispozitivul PMU oferă măsurarea doar a fazorului de tensiune în nodul rețelei, iar algoritmul A2 implică utilizarea atât a măsurătorilor fazorilor de tensiune, cât și a fazorilor de curent în toate ramurile incidente nodurilor unde sunt instalate dispozitivele PMU. Pentru a determina tensiunile nodale în nodurile în care nu este prevăzută instalarea PMU, împreună cu fazorii mășurați, se folosesc telemăsurările ale fluxurilor de putere din sistemul SCADA.

Conform algoritmului A1, nodurile rețelei electrice studiate sunt împărțite în două submulțimi P și Q , în timp ce matricea admitanțelor nodale este împărțită în patru submatrici, dintre care una este o matrice sub formă de bandă de rang maxim $[Y_{-qq}]$, în ipoteză că dispozitivele PMU situate în nodurile submulțimii P asigură observabilitatea deplină a rețelei electrice. Pentru a împărți matricea admitanțelor nodale în patru submatrici, trebuie de parcurs următorii pași:

1. Se determină rangurile tuturor nodurilor rețelei electrice, adică numărul de ramuri incidente fiecărui nod.

2. Nodul de rang maxim cu ramuri incidente acestui nod se exclude din circuit. Dacă există mai multe noduri de rang maxim, un nod este selectat în funcție de ordinea de numerotare a nodurilor din circuit, a căror excludere nu va duce la porționarea circuitului în subcircuite. Includerea unui nod de rang maxim q într-o submulțime P duce la debrucarea a g circuite în schema monofilară analizată a rețelei electrice. Cu alte cuvinte, numărul g de circuite deschise la fiecare pas este egal cu numărul de ramuri incidente la nodul care a fost exclus la acest pas.

3. După eliminarea unui nod, rangurile tuturor nodurilor rămase în schema monofilară a rețelei electrice sunt recalulate.

4. Se verifică dacă au mai rămas circuite închise în rețeaua studiată. Dacă au mai rămas, pașii 2 și 3 se repetă până când toate buclele închise sunt eliminate din schema monofilară a rețelei electrice.

5. Nodurile submulțimii P sunt numerotate în ordine aleatorie; un nod din fiecare arbore este inclus în mod obligatoriu în submulțimea P .

6. Nodurile arborilor se numerotează succesiv începând cu nodurile adiacente celor ce au fost incluse în submulțimea P .

7. Nodurile izolate se numerotează în ultimul rând în mod arbitrar.

8. În submulțimea Q se includ nodurile arborilor ce n-au fost incluse în submulțimea P precum și nodurile izolate.

Conform algoritmului A2, informațiile de la PMU instalat în nodul i despre valorile complexe ale curenților și tensiunilor asigură calcularea parametrilor de regim nu numai în locul de instalare, ci și pentru capătul opus al ramurii $i-j$ pe baza parametrilor schemei echivalente a ramurii date. Nodurile pentru care se calculează tensiunea pe baza parametrilor circuitului echivalent se numesc noduri cu pseudo-PMU și fac parte din submulțimea PP . Astfel, conform acestui algoritm, se formează trei submulțimi P , PP și Q . Pentru a împărți nodurile sistemului analizat în trei submulțimi, trebuie de parcurs următorii pași:

1. Se determină rangurile tuturor nodurilor rețelei electrice, adică numărul de ramuri incidente fiecărui nod.

2. Nodul de rang maxim, precum și toate ramurile incidente acestuia sunt excluse din schemă. În cazul în care există mai multe noduri cu rangul maxim, primul nod este selectat în ordinea numerotării nodurilor din rețea. Nodul exclus este inclus în submulțimea P .

3. După excluderea oricărui nod, se determină din nou rangurile nodurilor rămase în circuit. Nodurile ale căror ranguri au scăzut sunt indicate ca pseudo-PMU (se includ în submulțimea PP).

4. Pașii 2 și 3 se repetă până când în toate nodurile cu rang $R \geq 3$ sunt amplasate PMU-uri sau pseudo-PMU-uri.

5. Dacă rangul unui nod la orice pas este 1 sau 2, atunci nodul este inclus în submulțimea Q și valoarea complexă a tensiunii din acest nod se va determina liniar bilanțul curenților.

6. Nodurile fiecărei submulțimi sunt numerotate în ordine aleatorie, dar în mod succesiv: mai întâi, nodurile submulțimii P , în care sunt instalate PMU, apoi nodurile submulțimii PP , care au informații despre pseudo-măsurări, și în sfârșit - nodurile submulțimii Q , adică noduri de rang $R \leq 2$, neincluse în primele două submulțimi.

Amplasarea optimă a dispozitivelor PMU folosind algoritmi A1 și A2 este ilustrată cu ajutorul schemei test IEEE-14 cu 14 noduri. În acest scop, schemele monofilare ale IEEE-14 sunt prezentate cu numerotarea inițială a nodurilor, precum și numerotarea efectuată cu ajutorul algoritmilor A1 și A2. Este introdus și conceptul de diagramă punctuală. Prin noțiunea diagramă punctuală se înțelege o prezentare convențională a matricei admitanțelor nodale, în care toate elementele nenule se înlocuiesc prin puncte.

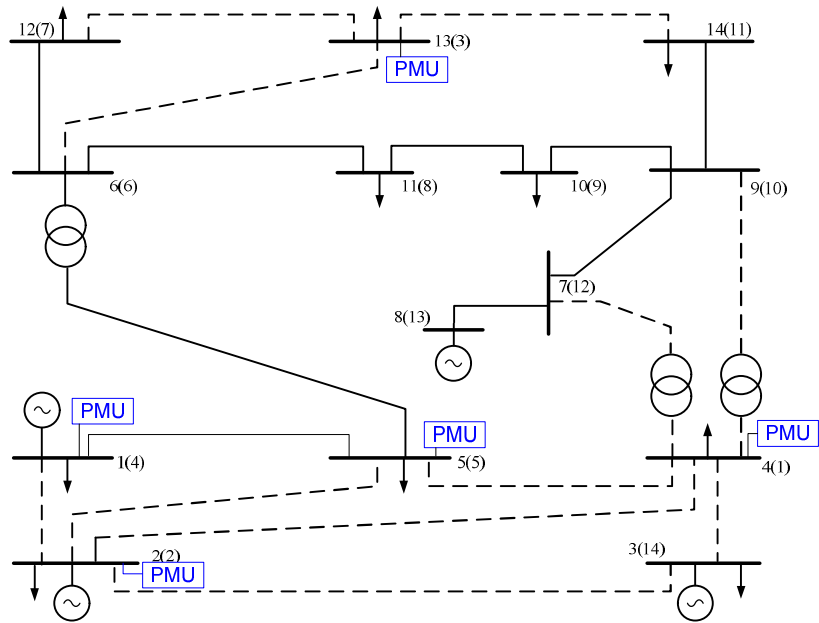


Fig. 4. Schema monofilară a schemei test IEEE-14 cu numerotarea inițială, precum și numerotarea efectuată conform algoritmului A1 (în paranteze)

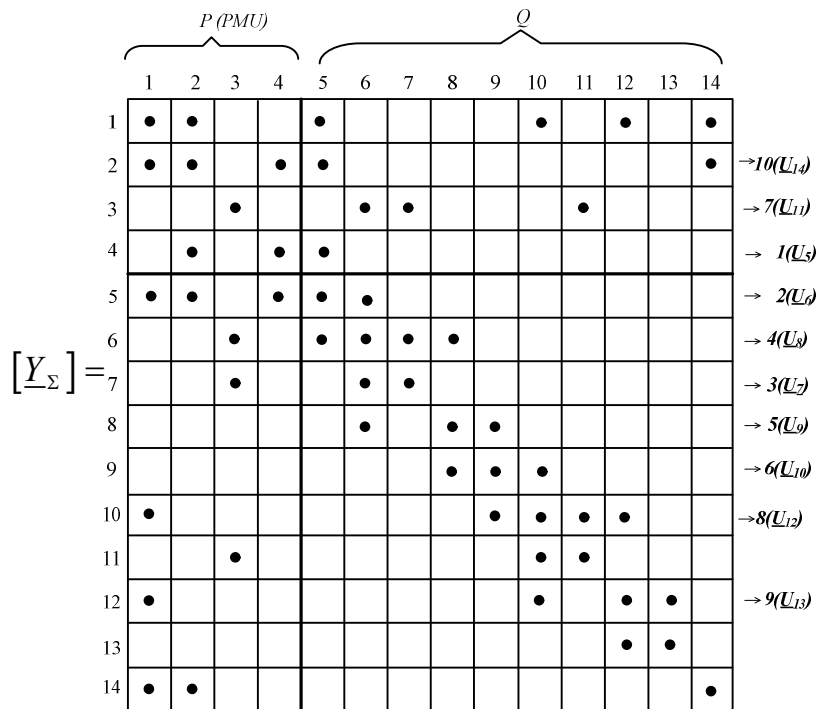


Fig. 5. Diagrama punctuală a matricei admitanțelor nodale pentru schema test IEEE-14, unde submatricea $[Y_{-qq}]$ este adusă la forma bandă (conform algoritmului A1)

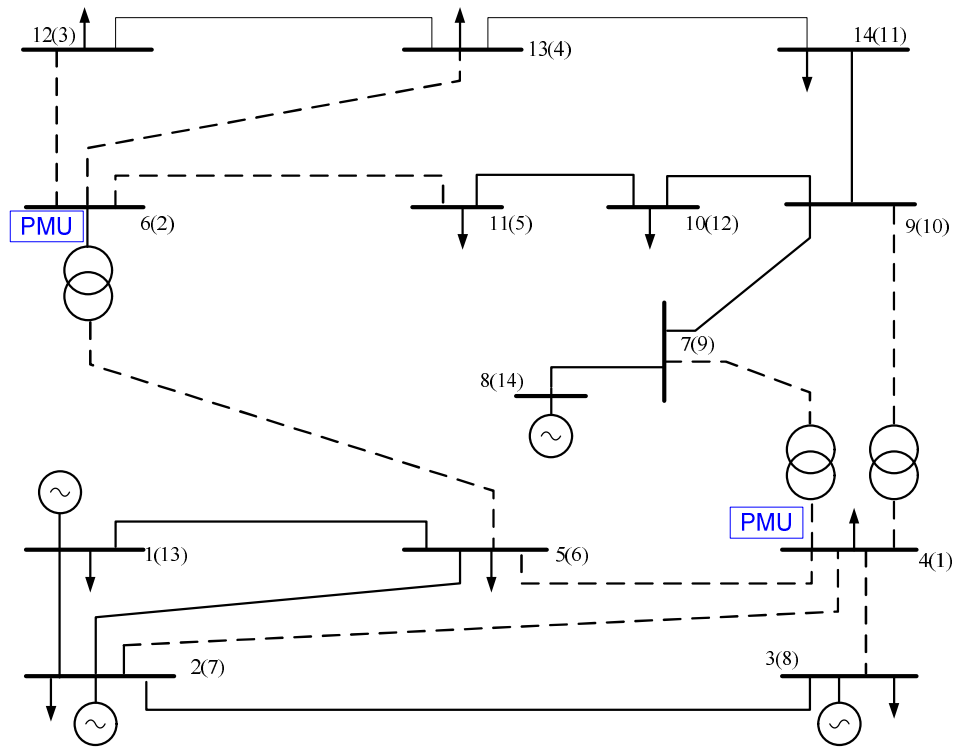


Fig. 6. Schema monofilară a schemei test IEEE-14 cu numerotarea inițială, precum și numerotarea efectuată conform algoritmului A2 (în paranteze)

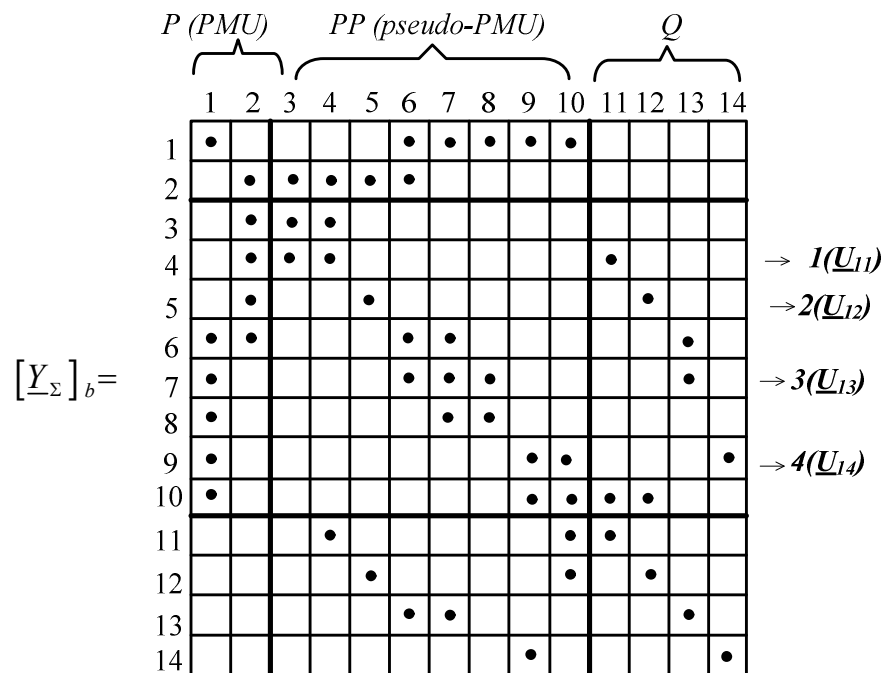


Fig. 7. Diagrama punctuală a matricei admitanțelor nodale pentru schema test IEEE-14, prezentată pe fig. 6 (conform algoritmului A2)

Evident, că avantajul algoritmului A2 față de A1 este reducerea numărului de PMU necesare pentru a asigura observabilitatea rețelei.

În tabelul 5 se prezintă rezultatele amplasării optime a dispozitivelor PMU în schemele test IEEE-14, IEEE-24, IEEE-30, IEEE-57, realizate folosind algoritmi A1 și A2, precum și preluate din alte surse pentru a compara rezultatele.

Tabelul 5. Comparația rezultatelor algoritmilor de amplasare optima a dispozitivelor PMU pentru scheme test IEEE

Algoritmi	Denumirea schemei test IEEE			
	IEEE-14	IEEE-24	IEEE-30	IEEE-57
Algoritm A1	4 PMU	7 PMU	8 PMU	10 PMU
Algoritm A2	2 PMU	5 PMU	5 PMU	9 PMU
Algoritm A3 [13]	5 PMU	6 PMU	----	10 PMU
Algoritm A4 [14]	4 PMU	7 PMU	10 PMU	17 PMU
Algoritm A5 [15]	4 PMU	7 PMU	10 PMU	17 PMU
Algoritm A6 [16]	4 PMU	----	10 PMU	17 PMU
Algoritm A7 [17]	4 PMU	----	10 PMU	16 PMU

O analiză comparativă a rezultatelor prezentate demonstrează avantajele algoritmilor A1 și A2 propuși în această lucrare, întrucât pentru toate circuitele de testare studiate s-au găsit soluții cu un număr similar sau mai mic de dispozitive PMU.

Capitolul al patrulea arată că algoritmi propuși pentru amplasarea optimă a PMU-urilor (A1 și A2) au un avantaj important: oferă o metodă accelerată și ultra-accelerată pentru calcularea regimului permanent de funcționare. În mod tradițional, calculul regimului permanent de funcționare și procesul de evaluare a stării statice a SEE sunt efectuate folosind date de telemetrie obținute din sistemele SCADA. Pentru a calcula regimul acestor rețele, se folosesc programe care implementează metoda tensiunilor nodale. Datele inițiale pentru calcul sunt modelul matematic al SEE, sarcinile din noduri sub formă de putere activă și reactivă și tensiunea într-unul dintre noduri, care se numește nod de echilibru. Se formează un sistem de ecuații, care sunt neliniare cu un număr mare de variabile și restricții sub formă de inegalități. Pentru rezolvarea unor astfel de sisteme de ecuații se folosesc algoritmi iterativi de aproximare succesivă a rezultatului dorit. Amplasarea dispozitivelor PMU în nodurile rețelei electrice folosind algoritmi A1 și A2 asigură simplificarea și accelerarea calculului regimului permanent. Minimizarea timpului necesar pentru calculul regimului permanent se realizează prin utilizarea metodei mărimilor determinate și a transformării matricei bloc a sistemului de ecuații liniare.

Matricea-coloană a tensiunilor nodale $[\underline{U}_\Sigma]$ se împarte în două submatrice $[\underline{U}_p]$ și $[\underline{U}_q]$, respectiv. Prima submatrice include tensiunile nodale determinate, adică mărimile independente, iar a doua submatrice include variabilele dependente. Submatricea $[\underline{U}_q]$ este determinată în funcție de $[\underline{U}_p]$. Această modalitate de împărțire a matricei coloane $[\underline{U}_\Sigma]$ este pusă la baza tuturor

metodelor rapide de calcul al regimului permanent al SEE [10]. După împărțirea matricei $[U_s]$ în submatrice sistemul de ecuații nodale ce descrie regimul de funcționare al SEE se poate scrie sub forma [10]:

$$\begin{cases} [Y_{pp}] \cdot [U_p] + [Y_{pq}] \cdot [U_q] = [J_p]; \\ [Y_{qp}] \cdot [U_p] + [Y_{qq}] \cdot [U_q] = [J_q]. \end{cases} \quad (19)$$

Dacă elementele submatricei $[U_p]$ sunt cunoscute (acestea sunt tensiunile nodale determinate), atunci ele pot fi considerate variabile independente, astfel variabilele dependente ale submulțimii $[U_q]$ sunt calculate din a doua ecuație a sistemului (19) folosind expresia:

$$[Y_{qq}] \cdot [U_q] = [J_q] - [Y_{qp}] \cdot [U_p], \quad (20)$$

unde matricea $[Y_{qq}]$ este adusă la o formă triunghiulară inferioară sau bandă, deoarece conform algoritmilor A1 și A2, în acest caz, numărul de dispozitive PMU amplasate în nodurile rețelei va fi minim.

Pentru a ilustra algoritmi de calcul în modul accelerat, a fost aleasă schema test cu 14 noduri IEEE-14. Regimul permanent a fost calculat cu utilizarea programului RastrWIN, iar rezultatele calculului sunt comparate cu tensiunile determinate folosind metode accelerate bazate pe algoritmi pentru amplasarea optimă a PMU-urilor (A1 și A2).

Dacă primul algoritm de amplasare A1 este aplicat pentru schema test IEEE-14, atunci ținând cont de instalarea PMU-urilor în nodurile 1, 2, 3 și 4 (Fig. 4, nodurile sunt indicate în paranteze), precum și utilizarea măsurărilor tradiționale ale fluxurilor de putere în noduri, putem folosi o metodă accelerată pentru a obține valorile tensiunilor nodale în toate nodurile dependente. Succesiunea de determinare a tensiunilor nodale este indicată în dreapta diagramei punctuale a admitanțelor nodale (Fig. 5).

Trebuie remarcat faptul că dacă tensiunea nodului i este determinată din expresia pentru bilanțul curenților al nodului j , atunci este necesar să se rezolve o ecuație liniară funcție de U_i . Dacă tensiunea nodului i se determină din expresia pentru bilanțul curenților al aceluiași nod i , tensiunea nodului respectiv se determină prin rezolvarea unei ecuații neliniare folosind metoda iterativă.

Calculul regimului permanent folosind algoritmul A2 conține două etape. În prima etapă, prin determinarea căderii de tensiune în ramurile incidente nodului de instalare a PMU-lui, se calculează tensiunile nodale ale nodurilor adiacente amplasamentului PMU (pseudo-măsurători), iar apoi, pe baza datelor PMU, pseudo-măsurătorilor și datelor tradiționale SCADA, sunt determinate valorile tensiunii în nodurile dependente din ecuațiile bilanțului de curenți. În acest

caz, este important ca, la fel ca în algoritmul A1, valoarea tensiunii pentru nodul i să fie determinată din expresia pentru bilanțul curenților al nodului j , atunci va fi necesar să se rezolve o ecuație liniară funcție de \underline{U}_i . În fig. 7, în dreapta diagramei punctuale a admitanțelor nodale, este indicată succesiunea de determinare a tensiunilor necunoscute în noduri dependente.

Diferențele dintre rezultatele obținute folosind algoritmi A1 și A2 și cele obținute cu utilizarea programului RastrWIN nu sunt mai mari de 0,1%, ceea ce indică acuratețea ridicată a rezultatelor obținute folosind algoritmul accelerat pentru calcularea regimului permanent de funcționare. Astfel de metode de calcul fac posibilă simplificarea semnificativă a procedurii de rezolvare, deoarece sunt rezolvate predominant sistemele de ecuații liniare, ceea ce are un efect pozitiv asupra vitezei de calcul și a preciziei rezultatelor obținute.

La fel în **capitolul al patrulea**, este prezentat un algoritm de amplasare a PMU-urilor pentru a efectua estimarea stării statice, când vectorul de stare a SEE este determinat prin rezolvarea unui sistem de ecuații liniare. Estimarea stării statice asigură prin calcul starea cea mai probabilă a sistemului la un moment dat în timp, pe baza datelor de măsurare și a parametrilor modelului matematic al rețelei electrice. Este posibil atât utilizarea în comun a datelor SCADA și PMU (algoritmi de estimare hibrid [17-20]), cât și utilizarea exclusivă a măsurătorilor MFS pentru a crea algoritmi simpli de estimare a stării statice. În această lucrare, se propune un algoritm de estimare a stării statice care se bazează pe utilizarea exclusivă a PMU-urilor; rețeaua electrică devine pe deplin observabilă cu ajutorul PMU-urilor instalate în nodurile sistemului, iar problema estimării stării se reduce la rezolvarea unui sistem de ecuații liniare, deoarece modelul stării statice ia o formă liniară. Avantajul acestui algoritm pentru evaluarea stării statice a SEE constă în aceea că se utilizează un sistem de ecuații liniare.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Pe baza rezultatelor teoretice și practice ale cercetării, se formulează următoarele concluzii:

1. Pe baza analizei literaturii din domeniu și cercetărilor proprii a fost elaborată o clasificare a metodelor de identificare [22] a parametrilor circuitelor echivalente pentru liniile electrice și transformatoarele de putere pe baza utilizării tehnologiei de măsurare fazorială sincronizată (Capitol 2, subcapitol 2.1).

2. Sunt elaborate metode pentru determinarea parametrilor pasivi ai liniilor, electrice transformatoarelor cu două și trei înfășurări [22, 23] pe baza metodelor bilanțului curenților și a bilanțului puterilor, precum și pe baza metodei cvadripolului utilizând măsurători efectuate în unul și două regimuri de operare ale obiectului studiat (Capitol 2, subcapitol 2.2, 2.3).

3. Au fost obținute relațiile analitice [23] pentru determinarea parametrilor pasivi ai schemei echivalente în formă de Γ , Π și T al unui transformator cu două înfășurări prin utilizarea parametrilor fundamentali ai cvadripolului (Capitol 2, subcapitol 2.3).

4. S-au dezvoltat algoritmi de amplasare a dispozitivelor PMU, care se bazează pe transformări ale matricei admitanțelor nodale folosind metoda mărimilor determinante [24, 25]. Algoritmii dezvoltați au fost testați pe scheme test cu un număr de noduri de la 9 pînă la 57. O analiză comparativă a rezultatelor obținute arată că algoritmi propuși asigură un număr mai mic sau similar de dispozitive PMU necesare instalării față de algoritmi cunoscuți. În acest caz, orice nod din rețeaua electrică care îndeplinește cerințele algoritmului aplicat poate fi selectat ca punctul de instalare PMU (Capitol 3, subcapitol 3.5).

5. Algoritmii de amplasare optimă a PMU-urilor dezvoltați în această teză asigură efectuarea calcului regimului permanent folosind procedee accelerate și ultraaccelerate [25, 26], datorită utilizării metodei mărimilor determinante și transformării sistemului de ecuații nodale (Capitol 4, subcapitol 4.1, 4.2). Estimarea stării statice a unui SEE se simplifică pronunțat, în cazul utilizării exclusive a PMU-urilor, deoarece pentru a determina vectorul de stare este necesar să se rezolve un sistem de ecuații liniare (Capitol 4, subcapitol 4.3).

Recomandări: din cauză faptului că parametrii schemelor echivalente ale elementelor SEE se modifică pe parcursul funcționării lor, se recomandă utilizarea metodelor de identificare pe baza tehnologiei MFS propuse în această lucrare pentru a actualiza parametrii schemelor echivalente ale modelelor matematice pentru SEE existente. Datele pentru efectuarea calculelor pot fi obținute de la PMU situate la nodurile rețelei conform algoritmilor de amplasare optimă propuși în cadrul cercetării, care asigură atât minimizarea costurilor de implementare și operare a acestei tehnologii, cât și observabilitatea deplină a rețelei electrice studiate. Parametrii actualizați ai modelelor

matematice pot fi utilizați ulterior pentru estimarea stării statice și calculul regimului permanent folosind algoritmi dezvoltați în acest studiu.

Direcții și obiective ale cercetării ulterioare: se propune direcționarea studiilor ulterioare pe această temă de cercetare către crearea de software pentru determinarea parametrilor pasivi ai schemelor echivalente pe baza datelor MFS (în timp real, precum și din măsurări istorice). Acest software reprezintă un interes practic din punctul de vedere al creării modelelor activ-adaptive ale SEE, precum și pentru diagnosticarea preventivă a stării echipamentelor.

Un alt domeniu important este crearea de software pentru algoritmi privind amplasarea optimă a dispozitivelor PMU, pentru a putea determina numărul minim și locațiile optime de instalare a complexelor PMU pentru rețelele electrice care conțin un număr mare de noduri. De mare importanță în acest context vor fi rezultatele utilizării algoritmilor dezvoltați pentru determinarea locațiilor optime pentru amplasarea PMU în nodurile sistemului energetic național pentru clasele de tensiune de 35-110 kV, precum și pentru rețelele de distribuție.

Ținând cont de interesul tot mai sporit din Republica Moldova față de sursele regenerabile de energie electrică, extinderea rețelelor distribuție, dezvoltarea SEE cu generare distribuită, o direcție promițătoare și în prezent puțin studiată pentru aplicarea tehnologiei MFS este estimarea stării statice în rețelele de distribuție. Această abordare presupune utilizarea măsurărilor sincronizate de la contoare de energie electrică sau alte dispozitive electronice inteligente pentru a crea bilanțul puterilor și pentru a identifica zonele rețelei cu pierderi tehnice și comerciale semnificative.

BIBLIOGRAFIE

1. ADAMIAC, M., PREMERLANI, W., KASZTENNY, B. *Synchrophasors: Definition, Measurement and Application*. Power Systems 2005 Conference Distributed Generation, Advanced Metering and Communication, March 8-11, 2005, Madren Center, Clemson University, Clemson, SC, USA p
2. ГРОП, Д. *Методы идентификации систем*: перевод с английского Васильев В.А., Лопатина В.И., под ред. Кринецкого Е.И. – М.: МИР, 1979 – 302 с.
3. ФРОЛОВ, М.Ю. *Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах электрической сети*. - Автореф. дис....кан. техн. наук. – Новосибирск, 2018 – 124 с.
4. МАНУСОВ, В. З. *Вероятностные задачи в электроэнергетике* : монография / В. З. Манусов. – Новосибирск : НЭТИ, 1981. – 118 с.
5. TÎRNOVAN, R.-A., *Protecții Digitale în Sistemele Electroenergetice*, Editura U.T.Press, ClujNapoca - 2019, ISBN 978-606-737-370-7, 198 p.
6. *Устройство синхронизированных векторных измерений RES670 вер. 2.1. Руководство по продукту*. Код документа 1MRK 511 367-BRU A. ABB, 2016
7. НЕБЕРА, А.А. *Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима* – В кн. Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем — 2011. — Сб. мат. межд. науч.-техн. конф. — СПб., 2011.
8. Plan de Dezvoltare a Rețelelor Electrice de Transport în perioada anilor 2018-2027. Î.S. “Moldelectrica”. Chișinău, 2017, 75 p. <https://moldelectrica.md/files/docs/TYNDP.pdf>
9. RAMÍREZ, P. S. L., LOZANO, C. A. *Comparison of PMU placement methods in power systems for voltage stability monitoring*. Ing. Univ., vol. 20, no. 1, pp. 41-61, 2016. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.iyu20-1.cppm>
10. МАКСИМОВИЧ, Н.Г. *Линейные электрические цепи и их преобразования*. «Госэнергоиздат», 1961. 263 с.
11. ГРИЦАЙ, М.А., ЖУРАВЛЕВ, В.Г. *Расчет потокораспределения в электрической сети по методу определяющих величин*. «Электричество», № 8,1968, с.17-22.
12. ЖУКОВ, Л.А., СТРАТАН, И.П. *Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем*. – М. «Энергия»,1979. 415 с.
13. СЕМЕНЕНКО, С.И. *Разработка алгоритмов размещения синхронизированных векторных измерений для повышения эффективности оценивания состояния ЭЭС* : автореф. дис. кандидата технических наук : 05.14.02. Екатеринбург: УрФУ – 2019. 24 с.
14. SANTOS CRUZ, M.A.D.R., ROCHA, H.R.O., PAIVA, M.H.M., SEGATTO, M.E.V., CAMBY, E., et al.. *An algorithm for cost optimization of PMU and communication infrastructure in WAMS*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, 2019, 106, pp.96-104. <10.1016/j.ijepes.2018.09.020>. <hal-01944258>

15. RAHMAN, N.H.A., ZOBAA, A.F., *Optimal PMU Placement using Topology Transformation Method in Power Systems*. Journal of Advanced Research (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2016.06.003>
16. LAOUID, A., REZAOUI, M.M., KOUZOU, A., MOHAMMEDI, R. *Optimal PMUs Placement Using Hybrid PSO-GSA Algorithm*. 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA), 2019, pp.1-5.
17. MOHAMMADI-IVATLOO, B., *Optimal Placement of PMUs for Power System Observability Using Topology Based Formulated Algorithms*. Journal of Applied Sciences, 2009, Issue 9: 2463-2468. DOI: 10.3923/jas.2009.2463.2468.
18. КОЛОСОК, И.Н.. *Повышение достоверности телеизмерительной информации в ЭЭС на основе контрольных уравнений*: автореф. дис. доктора технических наук : 05.14.02 / Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. - Иркутск, 2004. - 49 с.
19. КОРКИНА, Е.С. *Развитие методов оценивания состояния ЭЭС на основе интеграции данных SCADA и PMU*: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.14.02 / Место защиты: Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.- Иркутск, 2009.- 26 с.
20. MIRONOV, I. V. *Effect of placement of PMUs on state estimation in a power system*. Master thesis in Electrical Engineering/ UiT The Arctic University of Norway.- Narvik, 2016.- 64p.
21. PRESADĂ, V., EREMIA, M., TOMA, L. *Modified state estimation in presence of pmu measurements*. UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, 2014, Vol. 76, pp. 237-248.
22. MURDID, E., JINGAN, B., DOBREA I., VASILOS, E. Influence of Synchronized Measurement Errors on the Results of Identification of the Transmission Line Parameters. Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 44, Issue 1; pp. 14-19, 2020. ISSN: 1842-4805.
23. MURDID, E., STRATAN, I. Parameter Identification for Two-Windings Power Transformers. The 12th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN-2019, 10-11 October, Chisinau, Moldova, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905914.
24. MURDID, E., STRATAN, I. Optimal placement of synchronized phasor measurement technologies based on different methods of optimization. The 10th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN-2015, 6 October Craiova, Romania, 7-8 October, Chisinau, Moldova, pp. 199-204. ISBN 978-606-567-284-0.
25. MURDID, E., STRATAN I. Optimal PMU Placement and Algorithms' Development of Accelerated Calculations of State Estimation Performance in Power Systems. The 13th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN-2021, 7-8 October, Chisinau, Moldova, pp. 115-120, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600298.
26. MURDID, E. The use of synchronous vector measurements in the calculation of steady-state modes of electrical networks. Journal of Engineering Science, Volume XXX, Issue 2; pp. 90-103, 2023. ISSN 2587-3474. doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(2).08.

LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI LA TEMA TEZEI

Articole în diferite reviste științifice:

1. **MURDID, E.**, STRATAN, I. Parameter Identification of Transformers and Transmission Lines Based on Synchronized Measurements. Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 43, Issue 1; pp. 114-121, 2019. ISSN: 1842-4805, 0.49 c.t.
2. **MURDID, E.**, JINGAN, B., DOBREA I., VASILOS, E. Influence of Synchronized Measurement Errors on the Results of Identification of the Transmission Line Parameters. Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 44, Issue 1; pp. 14-19, 2020. ISSN: 1842-4805, 0.41 c.t.
3. **MURDID, E.** The use of synchronous vector measurements in the calculation of steady-state modes of electrical networks. Journal of Engineering Science, Volume XXX, Issue 2; pp. 90-103, 2023. ISSN 2587-3474. doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(2).08. 0.79 c.t.

Articole în culegeri științifice (culegeri de lucrări ale conferințelor internaționale):

1. **MURDID, E.** Analysis of the parameter identification methods using phase measurements. The 9 th International Conference on Electromechanical and Power Systems SIELMEN 2013, October 2013, Chisinau, ISBN 978-606-13-1560-4, 0.36 c.t.
2. **MURDID, E.**, STRATAN, I. Optimal placement of synchronized phasor measurement technologies based on different methods of optimization. The 10th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN-2015, 6 October Craiova, Romania, 7-8 October, Chisinau, Moldova, pp. 199-204. ISBN 978-606-567-284-0, 0.53 c.t.
3. **MURDID, E.**, STRATAN, I. Parameter Identification for Two-Windings Power Transformers. The 12th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN-2019, 10-11 October, Chisinau, Moldova, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905914, 0.3 c.t.
4. **MURDID, E.**, STRATAN I. Optimal PMU Placement and Algorithms' Development of Accelerated Calculations of State Estimation Performance in Power Systems. The 13th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN-2021, 7-8 October, Chisinau, Moldova, pp. 115-120, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600298, 0.55 c.t.

Articole în culegeri științifice (culegeri de lucrări ale conferințelor naționale):

1. **MURDID, E.**, STRATAN I. Estimarea parametrilor rețelelor electrice utilizând măsurări fazoriale sincronizate. Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 15-17 noiembrie, 2012. Chișinău, 2013, vol. 1, pp. 413-416. ISBN 978-9975-45-249-6. ISBN 978-9975-45-250-2 (Vol.1), 0.33 c.t.

ADNOTARE

Autor - MURDID Ecaterina. Titlul - Elaborarea modelelor matematice ale elementelor sistemelor electroenergetice bazate pe tehnologia măsurărilor fazoriale sincronizate. Teză de doctor în vederea conferirii titlului științific de doctor în științe tehnice la specialitatea 221.01. *Sisteme și tehnologii energetice*, Chișinău, 2023.

Structura tezei: Lucrarea conține o introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 101 titluri și include 5 anexe, 129 pagini, 41 figuri, 17 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 8 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: măsurări fazoriale sincronizate (MFS), modele matematice, parametrii schemelor echivalente, linie electrică, transformator de putere, observabilitatea rețelei electrice, calculul regimului permanent, estimarea stării statice a rețelei electrice.

Domeniul de studiu: științe inginerești.

Scopul tezei: dezvoltarea metodelor și algoritmilor de modelare matematică a elementelor SEE bazate pe tehnologia MFS.

Obiectivele tezei sunt determinarea factorilor care au cel mai semnificativ impact asupra modificărilor valorilor reale ale parametrilor pasivi ai schemelor echivalente ai liniilor electrice și transformatoarelor de putere; analiza cercetărilor științifice privind posibilitatea utilizării măsurătorilor sincronizate pentru rezolvarea problemelor practice din domeniul electroenergetic; dezvoltarea și cercetarea metodelor de identificare a parametrilor pasivi ai liniilor electrice și ai transformatoarelor de putere pe baza utilizării tehnologiei MFS; dezvoltarea algoritmilor pentru amplasarea optimă a dispozitivelor PMU, ținând cont de asigurarea observabilității SEE și minimizarea costurilor economice; studiul algoritmilor propuși privind amplasamentul optim al PMU pentru simplificarea algoritmilor de calcul al regimurilor permanente, precum și pentru simplificarea procesului de estimare a stării statice a SEE.

Noutatea și originalitatea științifică a tezei: se demonstrează că în condițiile utilizării măsurărilor fazoriale sincronizate devine posibilă utilizarea metodei tensiunilor nodale determinante, metodei balanței curenților și puterilor la noduri, metoda cuadripolului pentru a introduce noi abordări privind determinarea parametrilor schemelor echivalente ale elementelor componente ale SEE și, respectiv, calculul regimului permanent de funcționare.

Rezultatele obținute care contribuie la soluționarea problemei științifice importante, demonstrează că în condițiile utilizării complexe a tehnologiei MFS este simplificat semnificativ procesul de identificare a parametrilor pasivi ai schemelor echivalente ale elementelor SEE pe parcursul funcționării acestora, precum și algoritmi dezvoltați pentru amplasarea optimă a dispozitivelor MFS, pe lângă determinarea numărului minim de PMU-urile pentru instalarea în nodurile rețelei electrice asigură, de asemenea, o simplificare atât a calculului regimului permanent, cât și a estimării stării statice a SEE.

Semnificație teoretică: Teza aduce contribuții științifice la calculul și analiza regimurilor SEE, la metodologia de determinare a parametrilor schemelor echivalente fără efectuarea testelor de teren, la dezvoltarea modelelor de amplasare optimă a dispozitivelor de măsurări fazoriale sincronizate.

Valoarea aplicativă a lucrării și implementarea rezultatelor: Rezultatele lucrării pot fi utilizate de operatorii de rețea pentru a crea modelele SEE activ-adaptive, pentru a crea metodologii pentru diagnosticarea echipamentului pe parcursul funcționării, pentru a determina numărul minim de PMU instalate în rețelele de diverse clase de tensiune, cu condiția că este asigurată observabilitatea completă a SEE, pentru implementarea calculului accelerat al regimurilor de funcționare și evaluarea stării sistemului cu utilizarea numai a măsurărilor MFS precum și cu utilizarea simultană a măsurărilor MFS și SCADA.

АННОТАЦИЯ

Автор - МУРДИД Екатерина. **Название** - *Разработка математических моделей для элементов электроэнергетических систем на основе технологии синхронизированных векторных измерений*, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, специальность 221.01. Энергетические системы и технологии. Кишинэу, 2023

Структура работы: Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии со 101 источником, 5 приложений, содержит 129 страниц, 41 рисунок и 17 таблиц. На тему исследования опубликовано восемь научных статей.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения (СВИ), математические модели, параметры схем замещения, линия электропередач, силовой трансформатор, наблюдаемость электрической сети, расчет установившегося режима, оценивание состояния.

Область исследования: инженерные науки.

Цель диссертации заключается в разработке методов и алгоритмов математического моделирования элементов ЭЭС на основе технологии СВИ.

Задачи диссертации: определение факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на изменения реальных диапазонов значений пассивных параметров линий электропередач и силовых трансформаторов; анализ научных исследований на возможность использования измерений РМУ для решения практических задач в области электроэнергетики; разработка и исследование методов определения пассивных параметров схем замещения линий электропередач и силовых трансформаторов на основе применения технологии СВИ; разработка алгоритмов оптимального размещения устройств СВИ с учетом обеспечения наблюдаемости ЭЭС и минимизации экономических затрат; исследование предлагаемых алгоритмов расстановки СВИ на возможность увеличения надежности и упрощения как расчетов установившихся режимов, так и оценивания состояния ЭЭС.

Научная новизна и оригинальность работы: демонстрируется, что в условиях использования синхронизированных векторных измерений появляется возможность использовать метод определяющих узловых напряжений, метод баланса токов и мощности в узлах, метод четырехполюсника для внедрения новых подходов в определении параметров схем замещения элементов ЭЭС и в расчетах установившихся режимов.

Полученные результаты, способствующие решению важных научных задач доказывают, что при комплексном применении технологии СВИ существенно упрощается процесс идентификации пассивных параметров схем замещения элементов ЭЭС в процессе их эксплуатации, а разработанные алгоритмы оптимальной расстановки устройств СВИ, помимо определения минимального количества устройств для размещения в узлах сети, обеспечивают упрощение расчета установившегося режима и оценивания состояния ЭЭС.

Теоретическое значение: Данное исследование вносит научный вклад в расчет и анализ установившихся режимов ЭЭС, в методологию по определению параметров схем замещения без проведения натурных испытаний, в развитие математических моделей оптимального размещения устройств СВИ.

Практическая ценность работы и внедрение результатов: Результаты исследования могут использоваться сетевыми операторами для создания активно-адаптивных моделей ЭЭС, для создания методологий по диагностике оборудования в процессе эксплуатации, для определения минимального количества РМУ, устанавливаемых в сетях различных классов напряжения при условии обеспечения полноценной наблюдаемости ЭЭС, для осуществления ускоренных расчетов установившихся режимов и оценивания состояния системы при исключительном использовании данных СВИ, а также при совместном использовании измерений СВИ и SCADA.

ABSTRACT

Author - MURDID Ecaterina. **Title** - *Development of mathematical models for elements of electric power systems based on the technology of synchronized phasor measurements*. Doctoral thesis in technical sciences specialty 221.01. *Energy systems and technologies*, Chisinau, 2023

Thesis structure: The paper comprises an introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, 101 bibliography titles, and includes 5 Annexes, 129 pages, 41 figures, 17 tables. The research results are published in 8 scientific papers.

Keywords: synchronized phasor measurement (SPM), phasor measurement unit (PMU), mathematical models, equivalent circuit passive parameters, power line, power transformer, electric network observability, steady state calculation, state estimation.

Field of study: engineering sciences.

The purpose of the thesis consists in the development of methods and algorithms for mathematical modeling of EPS (electric power system) elements based on SPM technology.

Objectives are determination of the factors that have the most significant impact on changes in the real values of the passive parameters of power lines and power transformers; analysis of scientific researches on the possibility of using PMU measurements to solve practical problems in the field of electric power engineering; development and analyses of the methods for determining the passive parameters of equivalent schemes of power lines and power transformers based on the use of SPM technology; development of algorithms for the optimal placement of PMU devices, taking into account ensuring the observability of the EPS and minimizing economic costs; study of the proposed algorithms for arranging the PMU in scope of increasing reliability and speed of the algorithms for calculating steady-state modes, as well as for the possibility of simplifying the process of state estimation of the EPS.

Scientific novelty and originality of the work: it is demonstrated that under the conditions of using synchronized phasor measurements, it becomes possible to use the method of determining nodal voltages the method of balance of currents and power flows in nodes, the quadrupole method in order to introduce new approaches in determining the passive parameters of equivalent schemes of EPS elements and in steady-state calculations.

The results obtained, which contribute to the solution of important scientific problems, prove that with the integrated use of SPM technology, the process of identifying passive parameters of equivalent schemes of EPS elements during their operation is significantly simplified, and the developed algorithms for the optimal PMU placement, in addition to determining the minimum number of PMUs for placement in network nodes, also provide a simplification for steady state calculation and static state estimation of EPS.

The theoretical value. This study makes a scientific contribution to the calculation and analysis of steady-state EPS modes, to the methodology for determining the parameters of equivalent circuits without field tests, to the development of mathematical models of optimal PMU placement.

The practical value of the work and the implementation of research results. The results of the work can be used by network operators to create active-adaptive EPS models, to create methodologies for diagnosing equipment during operation, to determine the minimum number of PMUs installed in networks of various voltage classes, ensuring full EPS observability, to carry out accelerated calculations of steady state modes and assessing the system state estimation while using only SPM measurements as well as simultaneously using SPM and SCADA measurements.

MURDID ECATERINA

**ELABORAREA MODELELOR MATEMATICE
ALE ELEMENTELOR SISTEMELOR ELECTROENERGETICE
BAZATE PE TEHNOLOGIA MĂSURĂRILOR
FAZORIALE SINCRONIZATE**

221.01. SISTEME ȘI TEHNOLOGII ENERGETICE

Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești

Aprobat spre tipar: *17.11.2023*
Hârtie ofset. Tipar RISO
Coli de tipar.: 2.0

Formatul hârtiei 60x84 1/16
Tiraj 50 ex.
Comanda nr. 115

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