

ANALIZA FIABILITĂȚII ECHIPAMENTELOR ȘI SISTEMELOR ELECTRICE

RELIABILITY ANALYSIS OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS

CZU: 621.311.1

<https://doi.org/10.56329/1810-7087.26.1.19>



CONF. UNIV. DR. ING. VICTOR POPESCU,
DEPARTAMENTUL INGINERIE ELECTRICĂ,
<https://orcid.org/0000-0002-4634-2255>

CONF. UNIV. DR. ING. MIHAIL BALAN,
DEPARTAMENTUL INGINERIE MECANICĂ,
<https://orcid.org/0000-0002-7788-345X>

CONF. UNIV. DR. ING. VITALI VIȘANU,
DEPARTAMENTUL INGINERIE MECANICĂ,
<https://orcid.org/0000-0002-2273-342X>

CONF. UNIV. DR. ING. MIHAIL MELENCIUC,
DEPARTAMENTUL INGINERIE MECANICĂ,
<https://orcid.org/0000-0001-6575-8814>

DRD. IGOR GÎDEI,
DEPARTAMENTUL INGINERIE MECANICĂ,
<https://orcid.org/0000-0001-6188-942X>

DRD. VASILE POSTICA,
DEPARTAMENTUL INGINERIE MECANICĂ,
<https://orcid.org/0009-0009-4220-9754>

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

ABSTRACT

In the current context of the exploitation of electric power systems, equipment operating at different voltage levels exhibits a significant failure rate, directly impacting the continuity and security of electric power supply to consumers. Systematic analysis of failure causes and assessment of their impact on the reliability indicators of equipment and electrical systems are essential for developing effective technical and organizational measures to improve operational safety. The paper is devoted to the assessment of functional performances of equipment in electrical systems, taking into account the influence of random factors that determine the occurrence of operational failures. Based on an

innovative methodological concept for defining and using predictive performance indicators, characteristic parameters of failure processes were identified. The resulting parameters enable modeling and forecasting the development of factors affecting the reliability of electrical systems, helping to substantiate decisions on optimizing operation and maintenance strategies and improving the operational performances of electrical power systems.

Keywords: *reliability; failures; electrical systems; predictive indicators; random factors; power quality.*

REZUMAT

În contextul actual al exploatării sistemelor electroenergetice, echipamentele aferente diferitelor niveluri de tensiune înregistrează o frecvență semnificativă a defecțiunilor, care influențează direct continuitatea și securitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor. Analiza sistematică a cauzelor generatoare de defecțiuni, precum și evaluarea impactului acestora asupra indicatorilor de fiabilitate ai echipamentelor și ai sistemelor electrice constituie o premisă esențială pentru elaborarea unor măsuri tehnico-organizatorice eficiente de creștere a siguranței în exploatare. Lucrarea este consacrată evaluării performanțelor funcționale ale echipamentelor din sistemele electrice prin luarea în considerare a influenței factorilor aleatori care determină apariția refuzurilor în funcționare. Pe baza unui concept metodologic inovator privind definirea și utilizarea indicatorilor de prognoză ai calității funcționării, au fost determinați parametrii caracteristici ai proceselor de defectare. Parametrii obținuți permit modelarea și anticiparea evoluției factorilor care afectează fiabilitatea sistemelor electrice, contribuind la fundamentarea deciziilor privind optimizarea strategiilor de exploatare și mentenanță și la îmbunătățirea performanțelor de funcționare ale sistemelor electroenergetice.

Cuvinte-cheie: *fiabilitate; defecțiuni; sisteme electrice; indicatori de prognoză; factori aleatori; calitatea alimentării.*

Introducere

Problematika evaluării fiabilității sistemelor electrice aferente diferitelor niveluri de tensiune are un caracter preponderent probabilistic, fiind descrisă prin procese discrete, influențate de un ansamblu complex de factori cuantificabili și nequantificabili. Acțiunea acestora este determinată de criteriile de selecție a echipamentelor electroenergetice, de strategiile de dezvoltare a rețelelor și de particularitățile nivelurilor de tensiune analizate [1–4].

Identificarea și modelarea factorilor care influențează semnificativ valorile indicatorilor de fiabilitate și dinamica acestora constituie o condiție esențială pentru elaborarea unor metode eficiente de optimizare structurală și funcțională, precum și pentru dezvoltarea strategiilor destina-

te reducerii degradării performanțelor sistemelor electrice din diverse clase de tensiune [5,8,16].

Lucrarea abordează aspecte teoretice și aplicative privind calculul și evaluarea indicatorilor de fiabilitate ai sistemelor de distribuție și furnizare a energiei electrice către consumatori din sectoarele agricol și industrial, prin utilizarea unor modele matematice și statistice adecvate [6, 9–11].

În prezent, complexitatea sistemelor electroenergetice se află într-un proces continuu de creștere, determinat de majorarea consumului de energie electrică și de integrarea unui număr tot mai mare de consumatori. Această evoluție conduce la extinderea topologiilor de rețea și la creșterea numărului de interconexiuni, generând beneficii semnificative din punct de vedere tehnic și socio-economic. În același timp, spo-

rirea gradului de complexitate a infrastructurii energetice impune cerințe suplimentare privind asigurarea fiabilității, siguranței și calității alimentării cu energie electrică, ceea ce determină perfecționarea continuă a schemelor electrice și a echipamentelor utilizate [7, 12–15, 17–19].

Creșterea numărului de componente ale sistemelor electroenergetice este însoțită de majorarea probabilității apariției defecțiunilor și a întreruperilor în alimentarea consumatorilor. În aceste condiții, asigurarea unor niveluri corespunzătoare de fiabilitate este posibilă numai prin analiza comportamentului stocastic al factorilor de influență responsabili de apariția defectelor și de generarea pierderilor economice asociate.

În exploatarea curentă, echipamente precum transformatoarele de putere, separatoarele și întrerupătoarele înregistrează o incidență semnificativă a defecțiunilor, care afectează direct continuitatea, securitatea și calitatea alimentării cu energie electrică. Analiza sistematică a factorilor determinanți și evaluarea impactului acestora asupra indicatorilor de fiabilitate ai echipamentelor și rețelelor electrice permit fundamentarea unor măsuri tehnico-organizatorice orientate spre creșterea siguranței în exploatare și îmbunătățirea performanțelor sistemului electroenergetic.

Prezenta lucrare este consacrată analizei calitative și cantitative a funcționării echipamentelor din sistemele electrice de diferite niveluri de tensiune, prin integrarea influenței factorilor aleatori care generează defecțiuni în exploatare și afectează performanța globală a sistemelor electroenergetice.

Materiale și metode

Au fost efectuate cercetări sistematice privind fiabilitatea și calitatea funcționării sistemelor electrice aferente diferitelor niveluri de tensiune din Republica Moldova. Scopul principal al investigațiilor a constat în determinarea caracteristicilor defecțiunilor

(refuzurilor) înregistrate în rețelele electrice studiate, generate de acțiunea factorilor aleatori interni și externi sistemului electroenergetic.

Pentru evaluarea influenței acestor factori asupra procesului de alimentare cu energie electrică a consumatorilor conectați la sistemul energetic național, a fost elaborată o schemă structural-funcțională de calcul și un algoritm de prognoză a nivelului de fiabilitate. Instrumentarul metodologic dezvoltat a permis identificarea, clasificarea și ierarhizarea factorilor care influențează continuitatea alimentării, precum și structurarea etapelor de analiză necesare evaluării fiabilității rețelelor investigate.

Prelucrarea informațiilor referitoare la defecțiunile înregistrate a fost realizată prin aplicarea unor metode standardizate de analiză și calcul, fundamentate pe un cadru teoretico-metodologic complex. Acesta a inclus teoria grafurilor și reprezentarea matricială a structurilor de rețea, teoria probabilităților, metode de analiză statistică și prelucrare a datelor experimentale, teoria fiabilității, teoria ecuațiilor liniare și neliniare, modelare matematică și tehnici computaționale asistate de software specializat.

Datele experimentale au fost procesate cu ajutorul aplicațiilor informatice Microsoft Excel, Statgraphics și MATLAB, utilizate pentru efectuarea analizelor numerice, estimarea parametrilor statistici, modelarea proceselor investigate și realizarea simulărilor necesare fundamentării concluziilor privind nivelul de fiabilitate al sistemelor electrice studiate.

Rezultate și discuții

În baza conceptului de prognoză utilizat pentru caracterizarea calității funcționării echipamentelor din sistemele electrice (transformatoare de putere, separatoare, întrerupătoare etc.), au fost determinate frecvențele statistice de apariție a refuzurilor. Acestea reprezintă parametri esențiali pentru modelarea și prognozarea comportamentului factorilor care influențează nivelul de fiabilitate al sistemelor electrice.

Analiza parametrilor estimați a evidențiat faptul că distribuția teoretică cea mai adecvată pentru descrierea procesului de apariție a refuzurilor este distribuția normală (gaussiană). Setul de date experimentale disponibil a permis estimarea limitelor de variație ale mediei aritmetice pentru ansamblul observațiilor analizate și, implicit, determinarea intervalului de variație a numărului anual de deconectări aleatorii specifice rețelelor investigate. Astfel, valoarea așteptată a numărului mediu anual de deconectări aleatorii pentru o rețea electrică cu lungimea de 100 km se încadrează în intervalul:

$$57,62 < N_{dec} < 69,59, 57,62 < N_{dec} < 69,59 \quad (1)$$

Rezultatele obținute demonstrează că intensitatea medie anuală a deconectărilor aleatorii depășește 57,62 deconectări/an la 100 km de rețea, fără a depăși limita superioară de 69,59 deconectări/an la 100 km. Eroarea relativă asociată modelului de prognoză este de aproximativ 5%, ceea ce confirmă un nivel satisfăcător de precizie și relevanță practică a modelului statistic adoptat.

Ținând cont de caracterul aproximativ gaussian al distribuției și de valoarea experimentală a deviației medii pătratice $\sigma = 11,61$, au fost evaluate limitele marginale ale numărului prognozat de deconectări aleatorii pentru sisteme electrice cu lungimi diferite. În funcție de probabilitatea erorii admise ($\alpha = 1\%$ sau $\alpha = 5\%$), corespunzătoare unor niveluri de încredere de 99% sau 95%, au fost determinate intervalele de încredere pentru valorile estimate ale deconectărilor raportate la 100 km de rețea.

Pe baza relației (1) și cunoscând lungimea totală a sistemelor electrice analizate, au fost estimate valorile anuale agregate ale deconectărilor aleatorii:

$$N_{dec}^{\min} = 8168, \quad N_{dec}^{\max} = 9935. \quad (2)$$

Rezultatele obținute permit aprecierea nivelului probabilistic al întreruperilor și oferă informații utile pentru planificarea activităților de exploatare și mentenanță a rețelelor electrice.

Pentru evaluarea calității funcționării echipamentelor electrice instalate în rețele au fost calculați principalii indicatori de fiabilitate: durata medie a deconectărilor (τ), frecvența medie a deconectărilor (λ), durata medie de restabilire după deconectare (μ) și durata medie totală a deconectărilor (T_{med}). Valorile medii anuale ale acestor indicatori sunt prezentate în Tabelul 1.

Tabelul 1

Valorile estimative ale indicatorilor de fiabilitate

Sector	Indicatori examinați			
	τ_j, h	λ_j	μ_j, h	T_m, h
1	0,65	0,25	2,83	2,74
2	0,72	0,66	2,51	4,67
3	0,32	0,41	0,82	1,58
4	0,33	0,27	1,18	1,7
5	0,63	0,60	1,66	2,12
6	1,02	1,42	1,99	2,80

Sursa: elaborat de autori în baza cercetărilor proprii.

Rezultatele obținute privind indicatorii de calitate ai funcționării au fost determinate prin aplicarea unui model de prognoză a fiabilității sistemelor electrice analizate, bazat pe evaluarea principalilor indicatori de fiabilitate: durata medie a deconectărilor (τ), frecvența medie a deconectărilor (λ), timpul mediu de restabilire a alimentării după deconectare (μ) și durata medie totală a întreruperilor (T_m).

Eroarea relativă asociată estimărilor realizate este de aproximativ 5%, ceea ce confirmă un nivel corespunzător de acuratețe statistică și validează aplicabilitatea modelului de prognoză pentru evaluarea performanțelor de funcționare ale sistemelor electrice investigate.

Aplicarea rezultatelor cercetării oferă suportul necesar pentru planificarea și implementarea

unor măsuri tehnico-economice eficiente, orientate spre menținerea și creșterea nivelului de fiabilitate al sistemelor electrice și al echipamentelor aferente diferitelor clase de tensiune, în conformitate cu cerințele normative de exploatare.

Concluzii

Valorile estimate ale principalilor indicatori de fiabilitate ai sistemelor electrice constituie parametri reprezentativi pentru evaluarea calității funcționării echipamentelor instalate în rețeaua electrică națională. Determinarea și analiza acestor indicatori permit modelarea și prognozarea caracteristicilor defecțiunilor aleatorii care influențează nivelul de fiabilitate, continuitate și siguranță în exploatare al sistemelor electrice.

Rezultatele obținute confirmă eficiența modelului de prognoză aplicat pentru evaluarea performanțelor funcționale ale echipamentelor electroenergetice și pentru estimarea parametrilor caracteristici ai proceselor de defectare. Utilizarea acestui model facilitează identificarea factorilor care afectează fiabilitatea sistemelor electrice și contribuie la fundamentarea deciziilor privind optimizarea activităților de exploatare și mentenanță.

Totodată, rezultatele cercetării oferă suport științific pentru elaborarea și implementarea unor măsuri preventive și corective, optimizate din punct de vedere tehnic și economic, orientate spre reducerea riscului de avarii, diminuarea costurilor de exploatare și creșterea nivelului de fiabilitate al sistemelor electroenergetice.

REFERINȚE

1. POPESCU, V. și MALAI, L. (2019). Estimarea parametrilor sistemului fiabil pentru prelucrarea produselor agricole. *Știința Agricolă*, nr. 2, pp. 109-113. ISSN 1857-0003. Disponibil: https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/109-113_23.pdf
2. POPESCU, V., VIȘANU, V., URSATII, N., CECAN, A. și TODIRAȘ, T. (2023). Sistem electric cu fiabilitate sporită pentru întreprinderile specializate în deshidratarea produselor agricole. *Intellectus*, nr. 1, pp. 198-203. ISSN 1810-7079. Disponibil: <https://doi.org/10.56329/1810-7087.23.1.21>
3. ПОПЕСКУ, В., МАЛАЙ, Л. РОТАРЬ, В. и ВОЛКОНОВИЧ, О. (2019). Надежная система для переработки сельскохозяйственной продукции. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, вип. 49, с. 200-204. Disponibil: <https://zbirniksgm.kntu.kr.ua/pdf/49/26.pdf>
4. POPESCU, V. Study of transient voltaic arc accompanied by their influence on the reliability of distribution systems. *Annals of University of Oradea, Romania*, 2007 Energy beam, no. 13, p 60-63.
5. ERHAN, F., POPESCU, V. Characteristics of faults in systems for distribution of electricity. *Bulletin AGIR, Romania Year VIII, No. 4*, 2013 p.46, 237-241, 0.28 as ISSN 1224 – 7928.
6. POPESCU, V., POPA, A. BANTAȘ, R. Reliability Analysis of systems for distribution of electricity. *Acta Electrical Engineering*, Volume 54, Number 5, Romania in 2013, 0.2 as ISSN 1841 -3323.
7. ARDELEANU, M.E. Fault Localization in Cables and Accessories by Off -Line Methods. *Annals of the University of Craiova, Craiova No.13* 2007.
8. SECUI, D. C. The Sensitivity of the Electrical Substantionns Reliability Indices at the Variation of the Circuit - Breakers Stucking Probability . *Annals of the Ora-dea University. Fascicle of Energy Enginiring*, Vol.14, Oradea 2008.
9. ESPOSITO, B. M. SESSA, M., SICA, D. & MALANDRINO, O. (2020). Towards Circular Economy in the Agri-Food Sector. A Systematic Literature Review. *Sustainability*, vol. 12, nr. 18, pp. 95-107. Disponibil: <https://doi.org/10.3390/su12187401>

10. FIGIEL, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, vol. 98(4), pp. 461-470. ISSN 0260-8774.
11. HORABIK, J. & MOLEND, M. (2016). Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems Engineering*, vol. 147, pp. 206-225. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>
12. POPESCU, V. (2016). Systeme fiable pour la transformation des produits d'origine agricole. *Intellectus*, nr. 1, pp. 94-97. ISSN 1810-7079.
13. POPESCU, V. (2019). The evolution of disconnections from the distribution electrical systems from Republic of Moldova. *Journal of sustainable energy*, vol. 10, nr. 2, pp. 75-78. ISSN 2067-5534. Disponibil: <https://oaji.net/articles/2021/33336-1614957517.pdf>
14. POPESCU, V. Analysis of factors of influence on the reliability of power systems. *Acta Electrotehnica*, 2013, vol. 54, nr. 6, pp. 193-197.
15. POPESCU, V. și L. MALAI. (2019). Estimarea parametrilor sistemului fiabil pentru prelucrarea produselor agricole. *Știința Agricolă*, nr. 2, pp. 109-113. ISSN 1857-0003. Disponibil: https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/109-113_23.pdf
16. POPESCU, V., POPA, A. & BANTAȘ, R. (2013). Reliability analysis of systems for distribution of electricity. *Acta Electrotehnica*, vol. 54, nr. 5, pp. 387-389.
17. POPESCU, V., VIȘANU, V. URSATII, N., CECAN, A., TODIRĂȘ, T. (2023). Sistem electric cu fiabilitate sporită pentru întreprinderile specializate în deshidratarea produselor agricole. *Intellectus*, nr. 1, pp. 198-203. ISSN 1810-7079. Disponibil: <https://doi.org/10.56329/1810-7087.23.1.21>
18. TÎRȘU, M., POPESCU, V., BALAN, M. KURDOV, I., BALAN, T. et al. (2022). Instalație pentru deshidratarea semințelor în strat fluidizat. *Problemele Energeticii Regionale*, nr. 2 (54), pp. 114-122. ISSN 1857-0070. Disponibil: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.10>
19. ПОПЕСКУ, В., МАЛАЙ, Л., РОТАРЬ, В., ВОЛКОНОВИЧ, О. (2019). Надежная система для переработки сельскохозяйственной продукции. *Констрування, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, вип. 49, с. 200-204. Disponibil: <https://zborniksgm.kntu.kr.ua/pdf/49/26.pdf>

Mulțumiri: Rezultatele prezentate în lucrare au fost obținute în baza cercetărilor efectuate în cadrul proiectului: 020405 „Optimizarea tehnologiilor de procesare a alimentelor în contextul bioeconomiei circulare și al schimbărilor climatice”.

Data prezentării – 03.03.2026.

Acceptat spre publicare – 11.06.2026.