

<https://doi.org/10.55505/sa.2026.1.09>

UDC: 621.311.1-192



APRECIEREA FIABILITĂȚII SISTEMELOR ELECTRICE DE DISTRIBUȚIE RURALE

Victor POPESCU*, ORCID: 0000-0002-4634-2255,

Mihail BALAN, ORCID: 0000-0002-7788-345X,

Igor BEȘLEAGA, ORCID: 0000-0003-2982-6271,

Igor GÎDEI, ORCID: 0000-0001-6188-942X,

Vasile POSTICA, ORCID: 0009-0009-4220-9754,

Igor KURDOV, ORCID: 0000-0002-0731-5967

Universitatea Tehnică a Moldovei, Republica Moldova

*Correspondență: Victor Popescu - e-mail: victor.popescu@ie.utm.md

Abstract. This paper presents an assessment of the reliability of rural electrical distribution systems with complex structures and sector-specific configurations. Systematic investigations were conducted to evaluate the reliability and performance of rural electrical distribution systems at different voltage levels in the Republic of Moldova. The main objective of the study was to characterize the failure parameters recorded in networks with complex configurations and varying line lengths, determined by the action of different influencing factors. This methodological approach enabled the identification of solutions and the prioritization of factors affecting the continuity of electricity supply to rural consumers, as well as the systematization of operational stages involved in the reliability assessment of the investigated systems. The results obtained provide support for the optimization of design, operation, and maintenance of electrical systems at different voltage levels, featuring complex configurations and varying distribution line lengths.

Keywords: *Reliability; Electrical systems; Distribution systems; Power lines; Electric voltage; Maintenance; Rural areas.*

Rezumat. În această lucrare este prezentată o apreciere a fiabilității sistemelor electrice de distribuție rurale cu structură complexă și configurație specifică sectorului. Au fost realizate cercetări sistematice privind fiabilitatea și performanța sistemelor electrice de distribuție rurale la diferite niveluri de tensiune în Republica Moldova. Obiectivul principal al studiului a constat în caracterizarea parametrilor refuzurilor înregistrate în rețelele cu configurații complexe și diferite lungimi, determinate de acțiunea diversilor factori. Abordarea metodologică aplicată a permis identificarea soluțiilor și ierarhizarea factorilor determinanți ai continuității alimentării cu energie electrică a consumatorilor rurali, precum și sistematizarea etapelor operaționale implicate în evaluarea fiabilității sistemelor investigate. Rezultatele obținute în baza cercetărilor efectuate oferă suport pentru optimizarea proiectării, exploatării și mentenanței sistemelor electrice de distribuție la diferite niveluri de tensiune, caracterizate prin configurații complexe și lungimi variabile ale liniilor de distribuție.

Cuvinte-cheie: *Fiabilitate; Sisteme electrice; Sisteme de distribuție; Linii electrice; Tensiune electrică; Mentenanță; Zone rurale.*

INTRODUCERE

În conformitate cu particularitățile specifice sistemelor electrice de distribuție rurale, criteriile și metodele de apreciere a indicatorilor de fiabilitate a elementelor și sistemelor de distribuție pot fi divizate în mai multe categorii, fiecare având avantaje și dezavantaje proprii (Mokred & Wang, 2024; Polkovskaya & Yakupova, 2020; Rivas-Dávalos et al., 2025; Popescu et al., 2024).

În prima categorie pot fi incluse metodele analitice de calcul al fiabilității, care au la bază evenimente aleatorii și iau în considerare probabilitatea de apariție a acestora, respectiv situațiile de avarie inevitabile și susceptibile să apară în orice moment. Aceste evenimente sunt tratate ca fenomene aleatorii, iar metodele de calcul respective se aplică, în special, la determinarea indicatorilor de securitate ai sistemelor de distribuție (Ilyushin et al. 2022; Morar et al., 2009; Popescu et al., 2016).

În cea de-a doua categorie se includ metodele analitice de apreciere a fiabilității sistemului la nivelul proceselor cu caracter determinist. La baza acestor metode se află ipoteza caracterului determinist al fluxului de refuzuri ale elementelor componente ale sistemului. Metodele respective sunt utilizate la aprecierea mai multor indicatori de fiabilitate ai sistemelor de distribuție (Paiva et al., 2020; Popescu et al., 2023).

Cea de-a treia categorie este reprezentată de metodele de apreciere a indicatorilor de fiabilitate bazate pe modelarea statistică. Această modelare are la bază analiza proceselor cu caracter aleatoriu și permite determinarea diferitor indicatori de fiabilitate, precum și obținerea distribuțiilor statistice ale acestora, oferind o caracteristică informațională complexă privind fiabilitatea elementelor componente și a sistemului în ansamblu (Mohanty et al. 2024; Popescu, 2016).

A patra categorie include metodele de apreciere a fiabilității care iau în considerare anumite deviații în procesul de funcționare a sistemelor de distribuție (Popescu, 2019). Aceste metode se diferențiază de cele tradiționale prin faptul că iau în considerare apariția unor deviații legate de securitatea statică și dinamică a sistemului. Ca urmare, determinarea indicatorilor de fiabilitate prin intermediul acestor metode are un caracter specific, care diferențiază procesele analizate de cele clasice. Particularitatea acestora constă în posibilitatea apariției unor dereglări ale stabilității sistemului (Paul et al., 2024; Esposito et al., 2020; Popescu et al., 2023).

Procedeele de apreciere a indicatorilor de fiabilitate au constituit baza calculelor analitice privind fiabilitatea elementelor sistemelor de distribuție. Conform acestor procedee, poate fi determinată fiabilitatea elementelor componente, însă analiza completă a fiabilității nodurilor sistemului în ansamblu nu poate fi realizată integral. În plus, metodele analizate nu oferă soluții suficiente pentru determinarea indicatorilor de fiabilitate ai sistemelor rurale, iar unele formule utilizate pentru calculul indicilor sunt simplificate sau incomplete.

În conformitate cu metodele existente de calcul analitic al fiabilității sistemelor, prezentate în literatura de specialitate, se poate constata că autorii acestor lucrări propun aprecierea fiabilității instalațiilor de distribuție și a nodurilor sistemului care dispun de diverse scheme de conexiune, în funcție de configurația schemei și de evaluarea cantitativă a probabilității de apariție a regimurilor de avarie.

Cu toate acestea, pentru sistemele de distribuție rurale este necesară implementarea unor metode care să țină cont de graful structural al sistemelor și de configurația liniilor de distribuție, caracteristici care diferă semnificativ de cele ale altor sisteme de distribuție.

Reieșind din cele menționate, în lucrarea de față este prezentată o metodă de apreciere a fiabilității sistemelor electrice de distribuție rurale, care ia în considerare particularitățile specifice ale acestora și, în special, structura grafului de calcul.

MATERIALE ȘI METODE

Au fost efectuate cercetări sistematice privind fiabilitatea și performanța sistemelor electrice de distribuție rurală la diferite niveluri de tensiune în Republica Moldova. Obiectivul principal al studiului a constat în caracterizarea parametrilor defectiunilor (refuzurilor) înregistrate în rețelele analizate, determinate de acțiunea unor factori aleatori de influență, atât interni, cât și externi sistemului electroenergetic.

Această abordare metodologică a permis identificarea soluțiilor și ierarhizarea factorilor determinanți ai continuității alimentării cu energie electrică, precum și sistematizarea etapelor operaționale implicate în evaluarea fiabilității sistemelor investigate.

Aprecierea indicatorilor specifici a fost realizată conform metodologiilor standardizate de prelucrare și calcul, utilizând un cadru teoretico-aplicativ complex, care a inclus: teoria grafurilor și reprezentarea matricială a structurilor de rețea, teoria probabilităților, metode de analiză statistică, prelucrarea datelor experimentale privind defectiunile, teoria fiabilității, analiza ecuațiilor liniare și neliniare, modelarea matematică și simulările asistate de tehnica de calcul.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Pentru realizarea analizei fiabilității structurale a schemelor electrice ale sistemelor de distribuție este necesară utilizarea schemelor de alimentare care includ toate elementele componente, indiferent de starea acestora (conectate sau deconectate).

Toate elementele schemei analizate, precum și elementele componente ale sistemului de distribuție (rețele electrice, transformatoare de forță, separatoare, întrerupătoare etc.), trebuie divizate în două mulțimi:

- ♦ Prima mulțime este constituită din nodurile electrice;
- ♦ A doua mulțime este constituită din corzile electrice.

În calitate de noduri electrice sunt considerate nodurile fizice de conexiune ale mai multor elemente componente (sistemele de bare ale stațiilor de transformare, rețelele electrice, transformatoarele de forță), respectiv acele noduri în care fluxurile de putere pot fi distribuite în trei sau mai multe direcții, fiind conectate cel puțin trei corzi.

Având în vedere faptul că indicatorii de fiabilitate se determină concomitent în raport cu mai multe noduri de sarcină (mai multe secții ale sistemului de bare), aceste noduri electrice se unesc într-un nod comun de sarcină, ai cărui indicatori de fiabilitate sunt considerați nuli. Pentru un asemenea nod electric comun, probabilitatea de refuz (p_k) și fluxul de refuz al nodului respectiv sunt nuli (0).

Totodată, schema electrică principală a sistemului analizat se echivalează preventiv, iar unele elemente componente sunt înlocuite cu valori echivalente. Principiile de evidențiere a nodurilor și corzilor corespunzătoare se mențin neschimbate.

Mulțimea elementelor schemei electrice a sistemului de distribuție și a corzilor de conexiune dintre acestea formează graful schemei respective. Muchiile grafului reprezintă corzile, iar nodurilor schemei sistemului le corespund vârfurile grafului (nodurile grafului).

Fiabilitatea nodurilor grafului (elementele componente și echipamentele de comutație) din schema de bază a sistemului de distribuție sau din schema echivalentă se determină pornind de la schema structurală principală a elementelor componente, echivalentă procesului real de funcționare a sistemului analizat.

În schema grafului structural de calcul, pe lângă vârfurile grafului (nodurile de graf), există un vârf distinct, creat de sursele de generare ale sistemului real analizat, denumit, de regulă, vârf generare.

Dacă probabilitatea de funcționare fără refuz a sursei de alimentare a sistemului de distribuție este diferită de unitate, atunci influența acesteia este luată în considerare prin introducerea în schema analizată a unui element independent de fiabilitate.

Analiza structurii schemelor compuse, în urma căreia sunt evidențiate secțiunile monoelementare și bielementare în raport cu nodurile de sarcină (receptori), reprezintă formal o metodă de decompoziție a schemei principale de bază. Prin această abordare, din schema principală integrală prezentată se evidențiază doar acea parte în care defectarea unuia sau a două elemente componente conduce la deconectarea completă a nodului consumatorului (receptorului), reprezentat prin nodul (f) în schema analizată.

Graful structural rezultat al sistemului în așa caz va avea forma prezentată în figura 1.

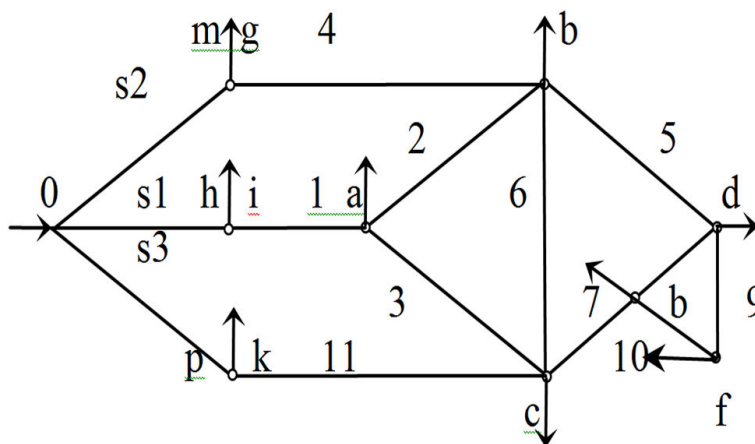


Figura 1. Graful sistemului de distribuție

Prin utilizarea particularităților de întretăiere a căilor independente, care permit determinarea secțiunilor respective, precum și a proprietăților de bază ale sistemului, poate fi elaborat un algoritm pentru identificarea secțiunilor minime. Probabilitatea refuzului simultan al două sau mai multe elemente independente în cazul schemelor sistemelor compuse este, practic, foarte redusă. Din acest motiv, pentru determinarea secțiunilor minime alcătuite din monoelemente sau bielemente poate fi elaborată o procedură algoritmică specifică.

O asemenea procedură poate fi utilizată pentru aprecierea fiabilității sistemelor care conțin câteva mii de elemente componente. Pentru astfel de scheme ale sistemelor de distribuție, secțiunile respective se formează atât din ramurile cât și din nodurile sistemului real analizat.

Asemenea scheme echivalente se construiesc în baza particularităților specifice ale schemelor complexe ale sistemelor de distribuție și alimentare cu energie electrică a consumatorilor rurali. Astfel, numărul căilor (grafurilor) independente dintre sursele de alimentare (s) și nodurile consumatorilor (receptori) nu depășește valoarea maximă a ordinului muchiilor incidente în fiecare vârf al grafului de calcul.

Reieșind din cele menționate, se poate constata că secțiunile monoelementare ale sistemelor de distribuție pot fi determinate prin intersecția a două căi (grafuri) independente.

Secțiunile sistemelor rurale alcătuite din două elemente pot fi determinate prin intersecția a trei căi (grafuri) independente. Totodată, secțiunile sistemului alcătuite din trei elemente pot fi determinate prin intersecția a patru căi (grafuri) independente.

Fiecare cale (graf) independentă se determină prin excluderea, în măsura posibilității maxime, a elementelor componente ale căilor (grafurilor) identificate anterior. În majoritatea cazurilor, numărul elementelor componente ale grafului minim dintre sursa de alimentare (s) și consumatorul rural (c) constituie doar câteva zeci.

Prin excluderea consecutivă a combinațiilor de elemente dependente din grafurile de ordinul întâi, al doilea, al treilea și al patrulea și prin verificarea integrității schemei respective pot fi determinate toate secțiunile minime posibile alcătuite din monoelemente și bielemente.

Principiul verificării integrității schemelor sistemelor de distribuție și alimentare cu energie electrică a consumatorilor rurali constă, în esență, în determinarea existenței unei căi (graf) funcționale între sursa de alimentare (s) și nodul de sarcină (receptor), care asigură conexiunea dintre acestea.

În schemele principale complexe ale sistemelor de distribuție și alimentare a consumatorilor, caracterizate prin existența mai multor interconexiuni între sursele de alimentare (s) și nodurile de sarcină (receptori), verificarea integrității schemei nu conduce, practic, la creșterea semnificativă a timpului de calcul în cazul excluderii succesive a unor elemente componente, comparativ cu schemele simple de interconexiune. Pentru analiza schemelor complexe pot fi propuse două metode distincte de determinare a secțiunilor alcătuite din monoelemente sau din două elemente, bazate pe particularitățile expuse anterior.

Secțiunea minimă a grafului schemei, raportată la nodul de sarcină (receptor), reprezintă mulțimea minimă de elemente ale schemei, a căror defectare conduce la refuzul sistemului în raport cu nodul analizat, respectiv la întreruperea alimentării cu energie electrică a acestui nod.

În schemele cu conexiune serie a elementelor componente există doar un singur graf, alcătuit din mulțimea de elemente componente 1, 2, 3...n și n secțiuni practic independente (1); (2), (3), ... (n).

Între secțiunile și grafurile schemei analizate există o corelație determinată. Dacă sunt cunoscute structura și componența grafului respectiv, pot fi determinate structura și componența secțiunilor corespunzătoare și invers.

Pentru schemele cu conexiune în serie ale sistemelor de distribuție, toate secțiunile și grafurile schemei respective pot fi reprezentate sub forma unor matrice ale secțiunilor (S) și grafurilor (G), ale căror coloane corespund numărului elementelor componente (n), iar rândurile corespund secțiunilor, respectiv grafurilor schemei analizate.

Dacă elementul (K) este inclus în secțiunea (j), atunci la intersecția coloanei (K) cu rândul (j) al matricei respective se înscrie valoarea 1, iar în cazul în care elementul lipsește din secțiune se înscrie valoarea 0.

Matricea secțiunilor sistemului de distribuție, pentru cazul analizat, are forma prezentată mai jos:

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \dots & i & \dots & j & \dots & k \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_i \\ \vdots \\ C_j \\ \vdots \\ C_k \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Matricea grafului sistemului de distribuție se va determina conform relației:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & i & \dots & j & \dots & k \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Pentru sistemele ce dispun de conexiune paralelă a elementelor componente matricea secțiunilor se va prezenta astfel:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & i & \dots & j & \dots & k \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Matricea grafului pentru un asemenea sistem se va prezenta în felul următor:

$$G = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & \dots & i & \dots & j & \dots & k \end{matrix} \\ \begin{matrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ \vdots \\ G_i \\ \vdots \\ G_j \\ \vdots \\ G_k \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (4)$$

Din analiza matricelor prezentate deducem:

- dacă elementul analizat participă concomitent în componența tuturor grafurilor, atunci acesta formează o secțiune monoelementară (orice element i inclus în componența grafului respectiv determină secțiunea i);
- dacă elementul respectiv intră în componența tuturor secțiunilor, atunci acesta formează un graf.

Pornind de la aceste particularități, se poate constata posibilitatea deducerii legii transformărilor echivalente de la secțiuni la coardele echivalente și invers.

CONCLUZII

În baza studiului realizat se poate evidenția faptul că secțiunile schemelor sistemelor de distribuție rurale pot fi clasificate în monoelementare și bielementare, în funcție de numărul elementelor comune rezultate în urma intersecției grafurilor schemei.

O secțiune monoelementară se formează atunci când toate grafurile independente intersectează un singur element, iar o secțiune bielementară apare în cazul în care intersecția acestora include două elemente. Determinarea secțiunilor se realizează pe baza grafurilor reale ale schemei analizate, și nu pe baza unor grafuri aleatorii, ceea ce asigură o apreciere mai exactă a structurii sistemului.

Analiza grafurilor independente permite identificarea elementelor și structurilor critice ale sistemelor de distribuție, constituind baza pentru evaluarea fiabilității acestora. Abordarea metodologică elaborată a permis sistematizarea etapelor operaționale de apreciere a fiabilității sistemelor investigate și identificarea unor soluții aplicabile pentru optimizarea proiectării, exploatarei și mentenanței sistemelor electrice de distribuție rurale cu configurație complexă și lungimi variabile ale liniilor de distribuție.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

1. ILYUSHIN, P.; S. FILIPPOV; A. KULIKOV; K. SUSLOV & D. KARAMOV (2022). Specific Features of Operation of Distributed Generation Facilities Based on Gas Reciprocating Units in Internal Power Systems of Industrial Entities. *Machines*, vol. 10, p. 693. <https://doi.org/10.3390/machines10080693>
2. MOHANTY, A.; A. RAMASAMY; R. VERAYIAH; S. BASTIA; S. DASH et al. (2024). Power system resilience and strategies for a sustainable infrastructure: A review. *Alexandria Engineering Journal*, nr 105, pp. 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.06.092>
3. MOKRED, S. & Y. WANG (2024). Voltage stability assessment and contingency ranking in power systems based on a modern stability assessment index. *Results in Engineering*, vol. 23. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102548>
4. MORAR, D.; B. D. GUZUN; C. MUCICHESCU and I. RODEAN (2009). Operational Reliability in Transmission Power Grid. *Analele Universității din Oradea. Fascicula de Energetică*, vol. 15.
5. PAIVA, T.; M. RIBEIRO & P. P. COUTINHO (2020). R&D Collaboration, Competitiveness Development, and Open Innovation in R&D. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 6, nr. 4, pp. 416–424. Disponibil: <http://doi.org/10.3390/joitmc6040116>
6. PAUL, S.K.; A. MOHAPATRA & D.C. DAS (2024). Robust network topology for unbalanced active distribution networks with uncertain injections. *IET Energy Systems Integration*, nr 6(S1), pp. 828–844. <https://doi.org/10.1049/esi2.12172>
7. POLKOVSKAYA, M. & M. YAKUPOVA (2020). Mathematical Modeling of the Causes of Failure of Elements of the Urban Electrical Network (10 kV). *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Russia. pp. 1–6. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271114
8. POPESCU, V. (2016). Système fiable pour la transformation des produits d'origine agricole. *Intellectus*, nr. 1, pp. 94–97. ISSN 1810-7079.
9. 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/2021/3336-1614957517.pdf>
10. POPESCU, V.; I. VIȘANU; T. BALAN; N. ȚISLINSKAIA; M. MELENCIUC & I. KURDOV (2024). Criterii de evaluare a nivelului fiabilității sistemelor de alimentare cu energie a întreprinderilor de procesare a produselor agricole. In: Conferința științifică internațională „Perspectivele și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației”, Cahul, vol. 11, partea 1, pp. 370–375.
11. POPESCU, V.; V. VIȘANU; N. URSATII; A. CECAN și T. TODIRAȘ (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>
12. RIVAS-DÁVALOS, F.; J.A. MARTÍNEZ-MENDOZA & E.A. MARTÍNEZ-CESEÑA (2025). The effects of load demand uncertainty on cascading overload failures in power systems. *Electrical Engineering*, nr. 107, pp. 4553–4566. Disponibil: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00202-024-02781-2>

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration among all authors. All authors read and approved the final manuscript.

Paper history

Received 03.04.2026; Accepted 02.06.2026

Copyright: © 2026 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).