

Wiesław Goc i Andrzej Kamiński

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

NIEZAWODNOŚĆ DWUSTRONNEGO ZASILANIA WĘZŁÓW ODBIORCZYCH

Streszczenie. Przy zasilaniu węzła odbiorczego X z więcej niż jednego źródła Z_i (rys. 1) powstaje zagadnienie równoczesnych wytrażeń tych źródeł. Zakładając niezależność źródeł otrzymuje się tylko zanikome prawdopodobieństwo przerw zasilania odbiorcy na skutek zakłóceń w systemie nadrzędnym. Dopuszczając możliwość występowania zakłóceń dotykających równocześnie dwa lub więcej źródeł należy liczyć się ze znacznym pogorszeniem niezawodności zasilania. W pracy podano wyniki badań analitycznych i statystycznych dla przypadku zasilania z dwóch źródeł.

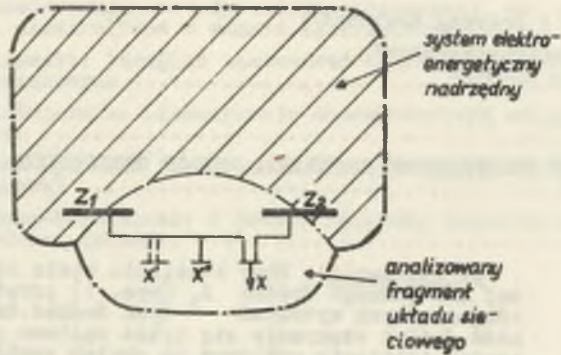
1. Sformułowanie zagadnienia

Niezawodność zasilania węzła odbiorczego z systemu elektroenergetycznego zależy w zasadzie od parametrów niezawodnościowych całości systemu i wszystkich jego elementów. Znane są metody obliczania odnośnych wskaźników niezawodnościowych, np. [4], [5], [7], [8], [9], [10]. Wadą ich jest duża pracochłonność przy rozpatrywaniu całości systemu, kłopotliwe nawet przy zastosowaniu maszyn cyfrowych. Stąd wynika koncepcja ograniczenia rozważań do mniejszych fragmentów sieci, wydzielonych z systemu i zasilanych z niego przez tzw. **źródła zasilania Z_1** .

W pracy ograniczono się do analizy zasilania z dwóch źródeł - rys. 1. Przy rozpatrywaniu tak ograniczonego układu zasilania powstają ważne dla praktyki zagadnienia równoczesnych wytrażeń źródeł zasilania Z_1 oraz niezależności tych źródeł. Zakładając niezależność źródeł otrzymano by się przeważnie zanikome jedynie prawdopodobieństwo przerwy zasilania odbiorcy na skutek równoczesnego wytrażenia źródeł Z_1 i Z_2 .

Źródła zasilania Z_1 i Z_2 - reprezentowane przez szyny zbiorcze stacji - leżą na styku rozważanego fragmentu sieciowego i reszty systemu elektroenergetycznego. Wskaźniki niezawodności źródła zasilania powinny obejmować zarówno niezawodność tychże szyn zbiorczych, jak i niezawodność systemu, z którego te szyny pobierają energię. Przy zasilaniu z dwóch źródeł zasilania, wskaźniki niezawodności każdego z nich będą więc zawierały mierniki niezawodności systemu elektroenergetycznego w s p ó l n e g o dla obu

tych źródeł. Można więc przypuszczać, że z racji istnienia części wspólnej wystąpi korelacja między zakłóceniami źródeł zasilania, nazwana w pracy współzależnością zakłóceń.



Rys. 1. - Szkic zasilania odbiorcy z systemu elektroenergetycznego
 Z rozpatrywanego układu mogą być również zasilani inni odbiorcy X' i X'' .
 Z_1 i Z_2 - źródła zasilania scharakteryzowane wskaźnikami D_1 , Q_1 oraz D_2 ,
 Q_2 [5], [8]. D_1 i D_2 - oczekiwane liczby zakłóceń odpowiednio źródeł 1 i 2.
 Q_1 i Q_2 - współczynniki niezdatności odpowiednio źródeł 1 i 2.

Należy się obawiać, że współzależność zakłóceń źródeł zmniejsza w istotny sposób niezawodność zasilania z systemu. W pracy przedstawiono najpierw odnośne badania statystyczne, po czym rozwinięto analityczny sposób ujęcia współzależności źródeł i podano przydatne dla praktyki, wyniki liczbowe charakteryzujące tę współzależność.

2. Statystyka zakłóceń źródeł zasilania

Dla potwierdzenia koncepcji współzależności zakłóceń źródeł przeanalizowano statystykę zakłóceń stacji 110 kV dużego okręgu elektroenergetycznego za okres sześciu lat.

Z łącznej liczby 154 trwałych przerw na systemach szyn zbiorczych stacji jedno- dwu- i trójsystemowych (łącznie 43 stacje), wyliczono wskaźnik rocznej liczby zakłóceń dla szyn zbiorczych d , [12]. Znalaziono również rozkład oraz wartość oczekiwaną czasu trwania przerw beznapięciowych szyn zbiorczych t .

Przechodząc teraz do zagadnienia możliwych równoczesnych przerw zasilania dwóch źródeł postawiono najpierw hipotezę niezależności zakłóceń na źródłach, uważając za źródło każdy system szyn zbiorczych (w liczbie 87). Przy tym założeniu wyznaczone uprzednio wartości d i t pozwalają obliczyć wartość oczekiwaną liczby przerw równoczesnych dla n wszystkich możliwych par źródeł. Dla $n = 3741$ otrzymuje się za okres 6 lat,

0,6 przerw równoczesnych.

Tymczasem w rzeczywistości stwierdzono w tym okresie

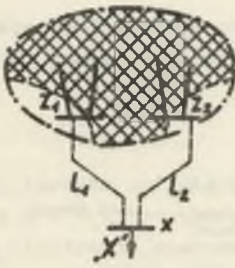
aż 17 przerw równoczesnych.

Dla praktyki projektowej wynika stąd nieodparty wniosek, że obliczenie tej tak istotnej dla pewności zasilania ważnych odbiorców wartości przy założeniu niezależności zakłóceń jest niedopuszczalne.

Bardzo pouczające jest rozbitcie wyżej podanej liczby 17 przerw równoczesnych na pary różnych typów. Rozróżniono pary utworzone przez:

- U_I - dwa systemy szyn tej samej stacji, rys. 2b,
 - U_{II} - dwa systemy szyn różnych stacji bezpośrednio sąsiadujących (tj. połączonych linią), rys. 2a,
 - U_{III} - wszystkie pozostałe pary.
- | | | |
|------------------------|--|----------|
| W podzbiorze U_I | o liczebności 50 było przerw równoczesnych | 11 |
| W podzbiorze U_{II} | o liczebności 112 było przerw równoczesnych | 5 |
| W podzbiorze U_{III} | o liczebności 3579 było przerw równoczesnych | 1 |
| | razem 3741 | razem 17 |

a)



b)



Rys.2. - Główne przyczyny współzależności

- a) 1. złe warunki atmosferyczne
2. przecięcia linii w wyniku zakłóceń pojedynczych elementów w systemie lub nadmiernych przepływów wyrównawczych
3. niesprawne działanie zabezpieczeń i łączników
- b) 1,2,3, jak w a) 4. zakłócenie natury mechanicznej lub elektrycznej ze względu na zbliżenie przestrzenne
5. niedziałanie wyłącznika sprzęgłowego przy pracy z zamkniętym sprzęgłem

Zapisy eksploatacyjne pozwoliły stwierdzić bezspornie w każdym z 16 przypadków grup U_I i U_{II} istnienie jednej pierwotnej przyczyny, która w szczególnych okolicznościach spowodowała równoczesne zakłócenie dwóch potencjalnych źródeł. Z punktu widzenia inżynierskiego jest to potwierdzeniem współzależności zakłóceń źródeł zasilania. Liczba danych statystycznych była niestety niewystarczająca do oszacowania współczynnika współzależności metodami statystyki matematycznej.

Z danych statystycznych znaleziono również czasy trwania przerw równoczesnych; rys. 3 przedstawia histogram dla par źródeł będących dwoma systemami (sekcjami) szyn tej samej stacji (rys. 2b); wartość średnia wynosi $t_{sr b} \approx 0,5$ h. Dla par źródeł będących szynami różnych stacji zakres czasów trwania jest nieco węższy, a $t_{sr a} \approx 1,5$ h.

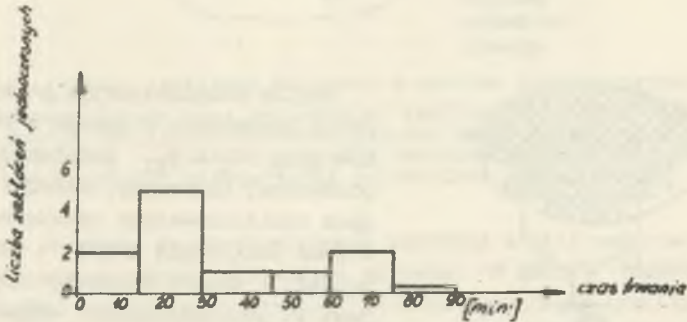
Analiza wyżej wspomnianych przyczyn pierwotnych i szczególnych okoliczności pozwoliła na następujące ich usystematyzowanie oraz wyznaczenie niektórych współczynników współzależności cząstkowych [5], [12]

W systemie (przed źródłami)

- niewybiorcze działanie zabezpieczeń,
- przeciążenie elementów systemu wywołane wyłączeniem innego elementu,
- okresowe nasilenie zakłóceń uwarunkowane złymi warunkami meteorologicznymi.

W samych źródłach

- względy konstrukcyjne (zbliżenie przestrzenne),
- niewybiorcze działanie zabezpieczeń,
- niesprawność wyłączników,
- błędy obsługi.



Rys. 3. Histogram zakłóceń jednoczesnych systemów szyn tej samej stacji

W tym zakresie dostępne są też wyniki badań licznych autorów np. [5], [6], [11], [12], obszernie uzupełniające wyniki badań statystycznych tej pracy.

Pozwala to na wyznaczenie poszukiwanej współzależności zakłóceń źródeł zasilania metodami analitycznymi - jako wypadkowej z poszczególnych przyczyn cząstkowych (por. p.4.).

3. Miary współzależności zakłóceń źródeł zasilania

Zawodność węzłów sieciowych źródeł Z_i i węzłów odbiorczych X (rys. 1) można scharakteryzować w sposób stosunkowo prosty przez dwa wskaźniki: [3] [4], [5], [8],

oczekiwana liczba przerw w roku - D

i wypadkowy współczynnik niezdatności - Q ;

przy czym

$$Q = \frac{D}{T}, \quad (1)$$

gdzie t jest oczekiwanym czasem trwania przerwy.

Przy założeniu niezależności zakłóceń źródeł zasilania 1 i 2, dla pary źródeł otrzymuje się:

- oczekiwaną liczbę zakłóceń równoczesnych w roku

$$D_{rn} \approx D_1 Q_2 + D_2 Q_1 \quad (2)$$

- współczynnik niezdatności

$$Q_{rn} \approx Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

Współzależność zakłóceń źródeł zasilania powoduje, że dla pary źródeł liczba zakłóceń równoczesnych D_{rz} jest większa od D_{rn}

$$D_{rz} > D_{rn}; \quad \text{również} \quad Q_{rz} > Q_{rn}.$$

Liczbę zakłóceń równoczesnych pary źródeł współzależnych można określić przy pomocy zależności

$$D_{rz} = D_{rn} + \kappa_{12} (D_1 + D_2) \quad (4)$$

będącej zarazem definicją współczynnika współzależności zakłóceń źródeł zasilania - κ_{12} .

Dla ilustracji znaczenia współzależności zakłóceń źródeł zasilania wprowadzono tzw. "wskaźnik krotności"

$$\varphi = \frac{D_{rz}}{D_{rn}} \quad (5)$$

podający, ile razy oczekiwana liczba przerw równoczesnych jest większa od liczby wyznaczonej przy założeniu niezależności.

Poza oczekiwaną liczbę zakłóceń równoczesnych D_{rz} , należałoby w zasadzie przeanalizować również drugi wskaźnik, współczynnik niezdatności dla zakłóceń równoczesnych Q_{rz}

$$Q_{rz} \approx \frac{D_{rz} t_{sr}}{T}, \quad (6)$$

gdzie t_{sr} - oczekiwany czas trwania przerwy równoczesnej.

Operując jednak stałymi wartościami średnimi t_{sra} i t_{srb} podanymi w p. 2 można ograniczyć się do analizy jednego tylko wskaźnika - D .

4. Badania współzależności zakłóceń źródeł zasilania

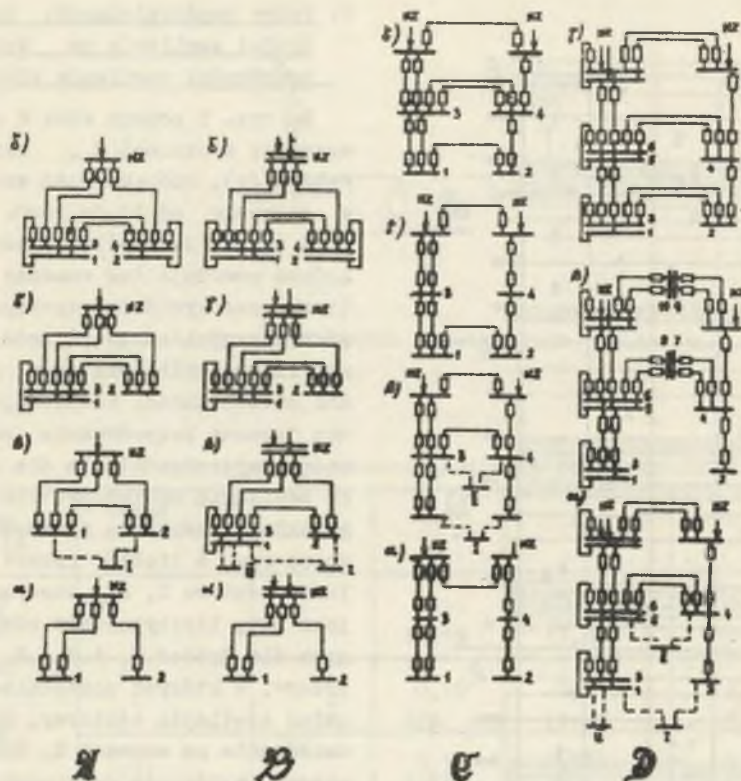
Wprowadzone w p. 3 wskaźniki zawodności źródeł, a także współczynnik współzależności zakłóceń κ , zależą od struktury systemu i zawodności jego elementów. Badając schemat sieciowy największego naszego okręgu energetycznego (ZEOPd) z punktu widzenia sposobu zasilania węzłów odbiorczych udało się wyodrębnić kilka powtarzających się - z niewielkimi zmianami - wycinkowych struktur sieciowych. Na tej podstawie zestawiono kilka szeregów tzw. wycinków typowych (na rys. 4 pokazano 4 typy \mathcal{A} , \mathcal{B} , \mathcal{C} , \mathcal{D} , pod które daje się podciągnąć większość spotykanych sytuacji). Sięgają one "w głąb systemu" jedynie do najbliższych dużych węzłów NZ, tj. bądź silnych węzłów sieciowych o wielokrotnych sprzężeniach z systemem i znacznej przelotności tych połączeń, bądź węzłów elektrownianych o znacznej rezerwie wirującej, (por. [2], [3]). Różnice pomiędzy poszczególnymi szeregami typowych wycinków leżą w liczbie, rodzaju i wzajemnej odległości węzłów nadrzędnych NZ:

- \mathcal{A} - jeden węzeł nadrzędny, jeden system szyn,
- \mathcal{B} - dwa systemy szyn tej samej stacji w NZ,
- \mathcal{C} - dwa pobliskie węzły nadrzędne jednosystemowe,
- \mathcal{D} - dwa węzły nadrzędne, w tym jeden dwusystemowy.

Głównym zadaniem pracy było wyznaczenie współczynnika współzależności zakłóceń źródeł κ i określenie wpływu, jaki na ten współczynnik mają następujące czynniki:

- a) liczba i rodzaj węzłów nadrzędnych NZ,
- b) rodzaj źródeł zasilania Z (systemy szyn tej samej stacji, lub różnych stacji),
- c) położenie źródeł zasilania Z względem siebie (w tej samej pętli sieci lub w pętlach różnych),
- d) położenie źródeł zasilania Z względem węzłów nadrzędnych NZ (w ich pobliżu lub daleko od nich),
- e) konfiguracja i stopień rozbudowy sieci w poszczególnych typach wycinków.

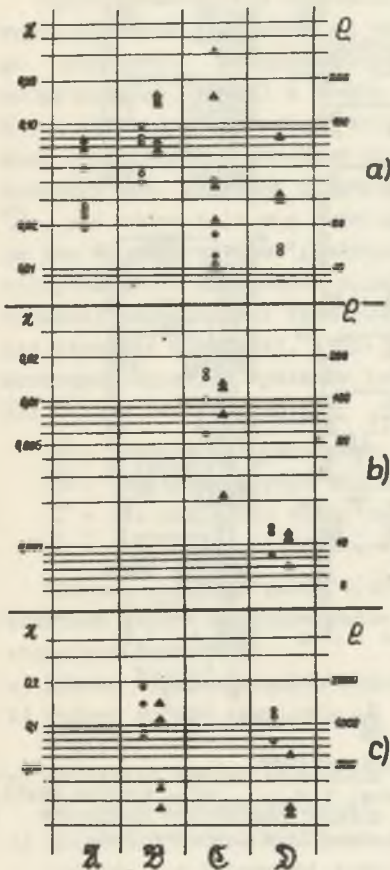
Celem określenia wpływu tych czynników na współczynnik współzależności zakłóceń źródeł zasilania przeprowadzono dla układów z rys. 4 szereg obliczeń niezawodnościowych, posługując się maszyną cyfrową Odra 1204 [5]. Dla aktualnych w kraju wartości wskaźników zawodności elementów i ich współzależności elementarnych wyznaczono wskaźniki zawodności dla poszczególnych źródeł, a następnie liczbę równoczesnych wytrażeń par źródeł, a na tej podstawie wyliczono współczynnik współzależności κ . Osiągnięte wyniki końcowe przedstawiono na rys. 5. Pozwoliły one na stwierdzenie, że: a) współczynnik współzależności źródeł zasilania zależy przede wszystkim od liczby i rodzaju węzłów nadrzędnych - co na rys. 5 przedstawiają różnice między typami $\mathcal{A} \dots \mathcal{D}$;



Rys. 4. Przykładowe wycinki systemu

NZ - duże węzły sieciowe, np. elektrowniane, 1,2,...,10 - źródła zasilania odbiorców Z_1, I, II, III - przykładowe układy zasilania odbiorców ze źródeł zasilania Z_1, Z_j (oznaczone linią przerywaną)

b) najsilniejsze jest zróżnicowanie wg rodzaju źródeł zasilania, - przy czym największe wartości, $\kappa = 0,1 \dots 0,2$, wykazują pary źródeł będące szynami tej samej stacji (układ III, rys. 5c); wartości najmniejsze, $\kappa = 0,001 \dots 0,01$ otrzymuje się dla par źródeł będących szynami różnych stacji leżących pośrodku wycinka, w pobliżu węzłów nadrzędnych (układ II rys. 5b); układ I - rys. 5a, tj. pary źródeł będących szynami różnych stacji leżących na skraju wycinka, wykazują wartości pośrednie, $\kappa = 0,01 \dots 0,1$.



Rys. 5. - Współczynniki współzależności zakłóceń źródeł zasilania X i wskaźniki krotkości g dla par źródeł zasilania.

Oznaczono X - 0 oraz g - Δ a) parą źródeł są szyny różnych stacji leżących na skraju wycinka - układ I, b) parą źródeł są szyny różnych stacji położonych blisko węzłów nadrzędnych - układ II, c) parą źródeł są szyny tej samej stacji - układ III

o wadze zagadnienia stanowi stosunek wartości X ($D_1 + D_2$) do sumy pozostałych składników D_{xz} , czyli do $D_{xu} + D_{rn}$.

Dla wyjaśnienia tych zależności wykonano obszernie obliczenia przykładowe dla układu dwustronnego zasilania z rys. 6. W tabl. 1 przedstawiono wyniki obliczeń oczekiwanej liczby przerw μ odbiorcy D_{xz} dla układu zasilania 110 kV i $l_1 = l_2 = 10$ km.

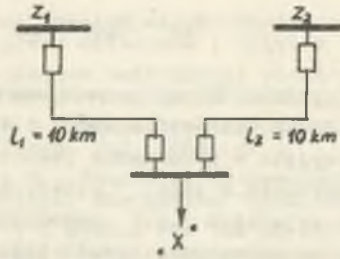
5. Wpływ współzależności zakłóceń źródeł zasilania na wskaźniki zawodności zasilania odbiorcy

Na rys. 5 podano obok X również wskaźnik krotkości g , określamy wzorem (5), którego rząd waha się w zakresie od 10 do 1000.

Z faktu, że współzależność zakłóceń powoduje tak znaczny wzrost liczby rzeczywiście występujących równoczesnych zakłóceń źródeł ponad liczbę wyliczoną przy założeniu niezależności zakłóceń, nie można jeszcze bezpośrednio sądzić o wadze tego zagadnienia dla ciągłości zasilania odbiorców. Dla prostego układu zasilania przedstawionego na rys. 6 liczbę przerw zasilania odbioru X , D_{xz} , otrzymuje się jako sumę liczby przerw równoczesnych dla źródeł Z_1 i Z_2 , D_{rz} oraz przerw, w których uczestniczy sam układ zasilania odbiorcy, D_{xu} , (np. zakłócenie na szynach X , lub równoczesne zakłócenia na torach 1 i 2, lub zakłócenie na torze 1 przy równoczesnym zakłóceniu na źródle 2 itd).

$$D_{xz} = D_{xu} + D_{rz} \quad (7)$$

przy czym wg wzoru (4) $D_{rz} = D_{rn} +$



Rys. 6. Przykład układu dwustronnego zasilania

Tablica 1

Wskaźniki zawodności zasilania odbiorcy

Typ wycinka	Układ zasilania	L.p.	D_x	D_{xn}	D_{xz}
A	I	1	0,10 14,5%	0,123 17,8%	0,69 100%
B	I	2	0,10 62%	0,116 71,5%	0,162 100%
	III	3	0,1 29%	0,126 37%	0,344 100%
C	I	4	0,1 60%	0,13 80%	0,167 100%
	II	5	0,1 76%	0,111 85%	0,131 100%
D	I	6	0,1 56%	0,135 75%	0,179 100%
	II	7	0,1 88,5%	0,111 97%	0,113 100%
	III	8	0,1 18,2%	0,13 23,6%	0,55 100%

Liczbę przerw spowodowaną przez sam układ zasilania, a więc bez udziału źródeł Z_1 i Z_2 , oznaczono przez D_x i dla aktualnych u nas wskaźników zakłóceń elementów układu zasilania. otrzymano

$$D_x = 0,10 \text{ przerw na rok}$$

Uwzględniając dodatkowo źródła zasilania i uważając je za niezależne otrzymuje się w kolumnie drugiej

$$D_{xn} = D_{xu} + D_{rn}.$$

W kolumnie trzeciej podano liczbę przerw zasilania odbiorcy D_{xz} z uwzględnieniem współzależności zakłóceń źródeł, a więc $D_{xz} = D_{xn} + K(D_1 + D_2)$; odnośne wartości przyjęto w porównaniu jako 100%.

Z wyników zestawionych w tabl. 1 widać, że w większości rozpatrywanych przypadków za wyjątkiem 1.p.7 zawadność źródeł zasilania zwiększa liczbę przerw węzła odbiorczego w sposób istotny, a często nawet kilkakrotnie 1.p. 1,3,8. Przy tym wzrost ten jest spowodowany przede wszystkim składnikiem $K(D_1 + D_2)$ obrazującym współzależność zakłóceń źródeł. Wiadziemy to stąd, że różnica $D_{xz} - D_{xu} = K(D_1 + D_2)$ jest większa od różnicy $D_{xn} - D_x$ spowodowanej zawadnością źródeł przy założeniu ich niezależności.

Poza przedstawionymi w tabelicy wartościami liczby zakłóceń równoczesnych D obliczono dodatkowo wskaźniki niezdatności Q ; analogiczne porównania przeprowadzone dla Q , nie zmieniają wyżej przytoczonych wniosków.

6. Wniosek końcowy

Z przeprowadzonej analizy wynika wniosek ogólny, że niezawadność dwustronnego zasilania węzłów odbiorczych X można obliczać w prosty sposób dla małych wycinków systemu wg rys. 1, przy czym należy uwzględnić zawadność węzłów zasilających Z_1 i Z_2 wraz z współzależnością ich zakłóceń. Zakresy wartości współczynnika współzależności K dla konkretnych systemów można, wyznaczyć przedstawioną w tej pracy metodą [3], a pierwszą orientacją dają wyniki zestawione na rys. 5.

Zawadność źródeł można ewentualnie pominąć w przypadkach silnie rozbudowanych układów sieciowych dla źródeł zasilania będących szynami różnych stacji leżących w pobliżu dużych węzłów systemu lub leżących na różnych pętlach sieciowych.

LITERATURA

1. Bojarski W.W.: Przybliżona metoda optymalizacji przemysłowych sieci rozdzielczych z uwzględnieniem niezawadności; Przegląd Elektrotechniczny 1969 z.11.
2. Goc W.: Analiza układów zasilania elektrycznego kopalń węgla kamiennego z punktu widzenia niezawadności; Mat.Symp. KE PAN Jabłonna 29-30. XI.1968.
3. Goc W.: Uwzględnienie współzależności zakłóceń źródeł zasilania przy wyborze układu zasilającego odbiorcy przemysłowego, rozprawa doktorska Gliwice 1971.

4. Kamiński A., Kula M., Oziemblewski K.: Reliability Computations and of Large Transmission Systems; III Power System Computation Conference, Rzym 1969.
5. Kula M.: Rozwinięty model analizy niezawodności elektro-energetycznych układów sieciowych, rozprawa doktorska; Gliwice 1970.
6. Kuźmin J.P.: Metody rachunków nadmiarowości elektroosnabżenija, uczytywajuszczije szluczaj razwitija awarij; IWUZ Energietika 1962 nr 1.
7. Mallard S.A., Thomas V.C.: A Method for Calculating Transmission System Reliability, IEEE Trans. PAS, 1968, nr 3.
8. Mrowiec H., Oziemblewski K.: Wskaźniki niezawodności zasilania stacji z sieci nadrzędneho napięcia, Energetyka 1972, nr 5.
9. Noferi P.L., Regiani F.: A Method for the Quantitative Evaluation of the Reliability of Supply in Sub-Transmission and Distribution Systems; ref.A.I.M.Liege, Mai 1971.
10. Rozanow M.N.: Wybor optimalnoj stiepeni rezerwirowanija pri projektirowanii sistem elektroosnabżenija; Elektrichestwo 1967 nr 4.
11. Sargent & Darvenizza: The Calculation of Double Circuit Outage of Transmission Lines, IEEE Trans. PAS, 1967 no 6.
12. Bargiel J., Bogucka S., Goc W.: Badania statystyczne parametrów niezawodnościowych elementów systemu elektroenergetycznego, Zesz.Nauk.Pol. Sl. Elektryka Nr 37, 1973

НАДЕЖНОСТЬ ДВУХСТОРОННЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ УЗЛОВ

Р е з ю м е

При электроснабжении потребительного узла X с более чем одного источника питания Z_1 рис. 2, возникает проблема одновременных отключений этих источников. При предположении независимости источников питания получается очень малая величина вероятности перерывов электроснабжения из-за отказов в системе высшей степени. Допуская возможность одновременного отказа двух и больше источников, следует ожидать значительного ухудшения надёжности электроснабжения.

В статье приведены результаты как статистических, так и аналитических исследований в случае снабжения потребительного узла из двух источников питания.

THE RELIABILITY OF SUPPLYING A CONSUMER FROM TWO SOURCES OF AN ELECTRIC TRANSMISSION SYSTEM

S u m m a r y

The problem of simultaneous outages of the supplying sources arises when an important consumer is supplied from more than one source of the system. Assuming that the sources are independent the probability of the interruptions due to system disturbances is very low. The reliability of supply is lower if one assume possibility of simultaneous faults affecting several sources. Statistical and analytical results for supplying the consumer from two sources are presented in the paper.