ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1970

Seria: ELEKTRYKA z.28 Nr kol. 275

MACIEJ KULA

Katedra Elektroenergetyki

UWZGLĘDNIENIE WPŁYWU ZMIENNOŚCI POGODY W OBLICZENIACH NIEZAWODNOŚCI ZŁOŻONYCH UKŁADÓW SIECIOWYCH

Streszczenie. Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej wykazano istotny wpływ warunków pogodowych na intensywność zakłóceń napowietrznej sieci 110 kV. Dla przyjętego modelu odwzorowania zmienności pogody wyprowadzono odpowiednie wzory na obliczanie wypadkowej intensywności zakłóceń układów równoległych. Zaproponowano uproszczony sposób uwzględnienia wpływu zmienności pogody w obliczeniach niezawodności układów o ustroju równoległym.

1. Cel i zakres referatu

Przeważająca większość dotychczas stosowanych schematów obliczania niezawodności pracy elektroenergetycznych układów sieciowych opiera się na dwóch podstawowych, upraszczających założeniach:

- wzajemnej niezależności poszczególnych zakłóceń,
- całkowitej losowości pojawiania się tych zakłóceń w czasie, z założoną stałą intensywnością.

Dopuszczalność tych upraszczających założeń wzbudzała już od dawna wątpliwości, ze względu na obserwowaną rozbieżność między obliczanymi na ich podstawie, a rzeczywiście występującymi wartościami wskaźników niezawodności, zwłaszcza w przypadku złożonych układów sieciowych o ustroju równoległym. Wskaźniki obliczane są dla tych układów często wielokrotnie korzystniejsze od rzeczywiście występujących.

W kilku uprzednio ogłoszonych publikacjach, [1], [3], [4] i [6], wykazano, że najważniejszymi przyczynami powyższych rozbieżności są: częściowe współzależności zakłóceń (uwarunkowane niewybiorczym działaniem zabezpieczeń, przeciążeniami w sta-

nach poawaryjnych lub przyczynami konstrukcyjnymi) oraz zmienność intensywności zakłóceń elementów, powodowana warunkami meteorologicznymi.

Niniejszy referat zajmuje się bliżej jedynie tą ostatnią przyczyną; jego celem jest wyjaśnienie wpływu zmian pogody na niezawodność układów sieciowych oraz zaproponowanie - na podstawie przeprowadzonych analiz zachowania się konkretnych układów sieci 110 kV - praktycznych wzorów na uwzględnianie wpływu tej zmienności w obliczeniach oczekiwanej liczby zakłóceń złożonych układów sieciowych.

2. Powiązanie problematyki referatu z innymi publikacjami

Liczbową miarą wpływu warunków atmosferycznych na niezawodność pracy jakiegokolwiek pojedynczego urządzenia może być zmienność chwilowej intensywności zakłóceń, tj. gęstości warunkowego prawdopodobieństwa pojawiania się zakłócenia w danej chwili (pod warunkiem, że zakłócenie uprzednio nie wystąpiło). Przy obliczaniu średnich wskaźników niezawodności charakter tej zmienności nie ma praktycznego wpływu na wynik jedynie przy rozpatrywaniu urządzeń lub elementów pojedynczych. W układach rozbudowanych, złożonych z wielu elementów, wpływ ten przejawia się w następstwie grupowania się zakłóceń w okresie gorszej pogody i związanym z tym wzrostem prawdopodobieństwa wzajemnego się ich nakładania.

W układach o ustroju szeregowym zjawisko to prowadzi - w porównaniu do równorzędnych układów z elementami o równoważnej stałej intensywności zakłóceń - do zmniejszenia się oczekiwanej liczby zakłóceń, w układach zaś równoległych - do ich zwiększenia.

Na zagadnienie istotności omawianych wpływów po raz pierwszy zwrócił uwagę D.P. Gaver, rozpatrując początkowo problem teoretycznie [2], na przykładzie układów o strukturze szeregowej, następnie zaś w kolejnej pracy [3], konkretyzując praktyczne propozycje uwzględniania tego wpływu w obliczeniach niezawodności złożonych układów sieciowych. W cytowanych pracach wykazano również, że wpływ zmiennej intensywności zakłóceń ele-

mentów na wypadkowe wskaźniki niezawodności jest szczególnie istotny w układach równoległych. W układach o strukturze szeregowej ma on natomiast znaczenie drugorzędne, co wynika bezpośrednio z formalnej analizy wzorów na wypadkowe wskaźniki niezawodności układów szeregowych. Dodatkowo wpływ ten osłabia stosowana w praktyce eksploatacyjnej zasada wyłączania spod napięcia urządzeń pracujących szeregowo z elementami znajdującymi się w pozakłóceniowej naprawie, zmniejszająca do minimum prawdopodobieństwo występowania nawzajem na siebie zachodzących zakłóceń.

Zaproponowane w publikacji [3] uproszczone wzory na wypadkową średnioroczną intensywność jednoczesnych zakłóceń układu dwóch elementów równoległych, wzbudzały wiele zasadniczych wątpliwości, związanych głównie z kryteriami wyboru przyjętego tam modelu zmienności pogody, z zasadami kwalifikowania poszczególnych zjawisk meteorologicznych do pewnych zastępczych okresów pogodowych oraz z zakresem stosowalności przyjętych założeń upraszczających. Wątpliwości powyższe pogłębił opublikowany w roku 1968 artykuł R. Billingtona i K. Bollingera [5]; autorzy ci, porównując dla najprostszych układów równoległych wyniki uzyskiwane przy pomocy własnego, dokładnego modelu obliczeniowego, opartego na teorii procesów stochastycznych Markowa, z wynikami otrzymanymi na podstawie wzoru podanego przez Gavera, wykazali, że w niektórych przypadkach ten ostatni wzór może prowadzić do dwukrotnego zawyżenia wartości rzeczywistej.

W świetle wyżej wymienionych zastrzeżeń do wzorów Gavera i wobec skomplikowanej postaci proponowanego w [5] modelu obliczeniowego, uznano za zasadnicze, szczegółowe zadanie niniejszej pracy:

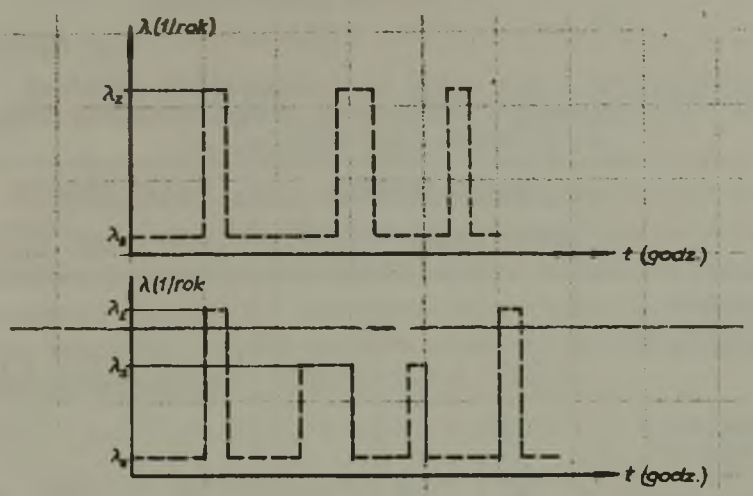
- wybór modelu odwzorowania zmienności pogody i jego ilościowe uzasadnienie;
- wyprowadzenie prostych - w miarę możności - wzorów na wypadkową intensywność zakłóceń układów równoległych z uwzględnieniem wpływu zmienności pogody i ich liczbową przykładową weryfikację przez porównanie z postępowaniem dokładnym, według [5].

3. Statystyczny model odwzorowania zmienności pogody

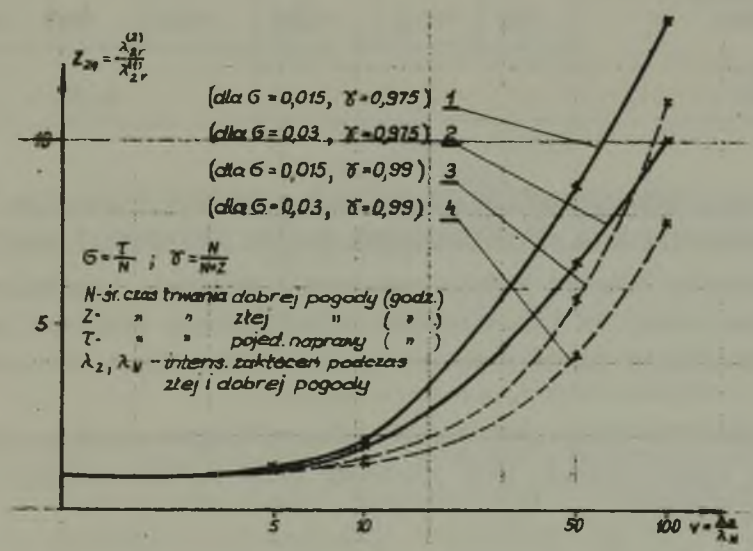
W ogólnym przypadku intensywność zakłóceń $\lambda(t)$ urządzenia, poddanego wpływom zmiennego środowiska, jest stochastyczną funkcją czasu, zaś przebieg wartości oczekiwanej w ciągu roku $\lambda(t)$ jest wyraźnie skorelowany z następstwem określonych, bardzo różnorodnych stanów pogodowych.

Praktycznie, wobec braku wystarczająco dokładnych ilościowych informacji o chwilowych stanach pogody, jedyną realną możliwością ilościowego uchwycenia wyżej wymienionych zależności jest przyjęcie uproszczonych modeli zmienności pogody, zakładających stałość intensywności zakłóceń podczas trwania wyróżnionego stanu pogody i ich skokową zmianę przy przejściu z jednego stanu pogody w drugi. Najprostszym modelem zmienności pogody jest model dwustanowy (p. rys. 1a), wyróżniający naprzemian zdarzające się okresy umownie dobrej i złej pogody, z oczekiwanymi czasami trwania odpowiednio "N" i "Z" godzin i z występującymi w czasie ich trwania stałymi intensywnościami zakłóceń λ_N i λ_Z. Ogólnie, można sobie wyobrazić modele odwzorowujące większą liczbę stanów. Na rys. 1b przedstawiono model trójstanowy, wyróżniający - oprócz pogody zdecydowanie dobrej i złej - pogodę umiarkowanie niekorzystną (nazwaną umownie średnią), o oczekiwanym czasie trwania "S" i średniej intensywności zakłóceń λ_S.

Praktyczną celowość rozpatrywania takich modeli zmienności pogody potwierdziła wykonana uprzednio przez autora statystyczna analiza rozkładu intensywności zakłóceń wybranych układów napowietrznej sieci 110 kV [6]. Końcowe wyniki tej analizy ilustruje tablica 1; wykazała ona, że z wielu rozpatrywanych stanów pogodowych wyraźnie i istotnie wyróżniają się okresy burzowe (pogoda zła) oraz okresy występowania mgieł (pogoda średnia).



Rys. 1. Modele zmienności pogody: dwu- i trójstanowy λ_r, λ_s, λ_Z - intensywności zakłóceń



Rys. 2. Porównanie wyników obliczeń intensywności zakłóceń układu równozmienności pogody: dwustanowego ($\lambda_{2r}^{(2)}$) i jednostanowego ($\lambda_{2r}^{(1)}$)

Tablica 1

Zmienność pogody i jej wpływ na intensywność zakłóceń sieci 110 kV na terenie Południowego Okręgu Energetycznego w latach 1960-1962

	Rejon Katowic			Rejon Krakowa		
	burze	mgły	dobra pogoda	burza	mgły	dobra pogoda
Frakcja czasu występowania danego okresu pogody	0,005	0,020	0,975	0,004	0,034	0,962
Liczba rozpatrywanych okresów pogodowych (w ciągu 3 lat)	100	139	239	144	155	299
Liczba zakłóceń (na 100 km i rok trwania danej pogody - dla poszcz. okresów	130	41,5	1,4	355	28	2,05
- średnioroczna	2,84			4,38		

4. Wzory na intensywność jednoczesnych zakłóceń elementów układu równoległego z uwzględnieniem wpływu zmienności pogody

Dla omówionych powyżej modeli zmienności pogody wyprowadzono przybliżone wzory na intensywność jednoczesnych zakłóceń układu równoległego 2 jednakowych elementów połączonych równolegle (λ_{2r}).

Ze względu na dość złożoną postać uzyskanych wyrażeń przytacza się tutaj jedynie wzór uzyskany przy założeniu modelu dwustanowego ($\lambda_{2r}^{(2)}$):

$$\lambda_{2r}^{(2)} = \frac{2\,N\tau\lambda_N}{T(N+Z)}\left(\lambda_N\frac{N}{N+\tau} + \lambda_Z\frac{\tau}{N+\tau}\right) + \frac{2\,Z\tau\lambda_Z}{T(N+Z)}\left(\lambda_Z\frac{Z}{Z+\tau} + \lambda_N\frac{\tau}{Z+\tau}\right. \tag{1}$$

gdzie:

τ - średni czas napraw,

λ_Z, λ_N - intensywności zakłóceń elementów podczas okresów Z i N,

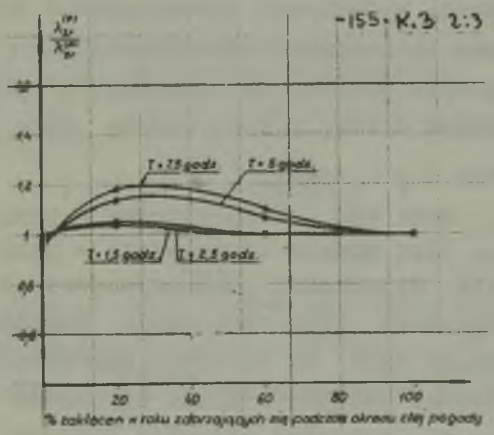
T - całkowity okres odniesienia (1 rok - przy pominięciu wyłączeń konserwacyjnych).

Analogiczne wyrażenie przy założeniu modelu trójstanowego ($\lambda_{2r}^{(3)}$) posiada jeszcze bardziej rozbudowaną postać; jako dodatkowe parametry wchodzą do niego: średni czas trwania stanu średniej pogody S, intensywność zakłóceń w okresie S - λ_S oraz proporcja liczby okresów średniej pogody do liczby okresów dobrej pogody β.

$\lambda_{2r}^{(3)}$ jest więc zatem funkcją N, Z, S, λ_N, λ_Z, λ_S, τ oraz β.

Przyjęte założenia wyjściowe oraz ogólny schemat wyprowadzenia omawianych wzorów przedstawiono w załączniku nr 1.

Stopień dokładności wyprowadzonych przybliżonych wzorów sprawdzono przez porównanie z wynikami uzyskanymi ze schematu



Rys. 3. Porównanie wyników obliczeń intensywności zakłóceń układu równoległego dwóch elementów, uzyskanych przy pomocy

a) wzoru przybliżonego wyprowadzonego w niniejszej pracy λ_{2r}^{P},

b) schematu obliczeniowego dokładnego (wg L5) - ($\lambda_{2r}^{(M)}$).

Założono: duwstanowy model pogody: N = 200 godz., Z = 1,5 godzin, τ - średni czas trwania pojed. naprawy

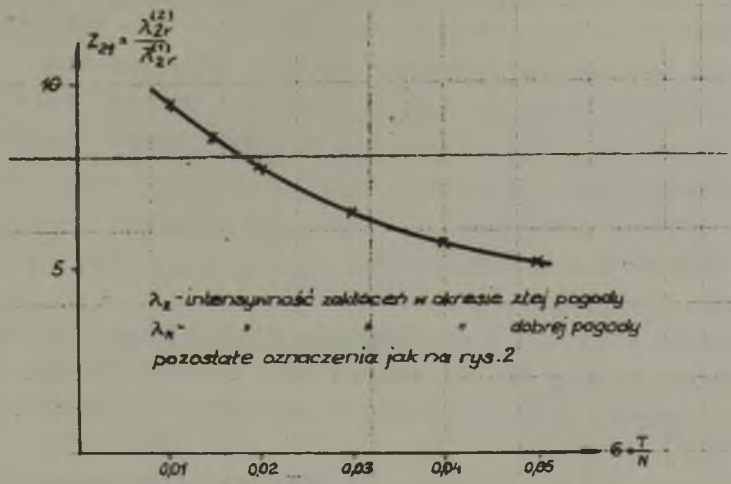
obliczeniowego, opartego na teorii procesów stochastycznych Markowa, podanego w [5]. Wyniki tego sprawdzenia dla modelu dwustanowego przedstawiono w formie wykreślnej na rys. 3. Z rysunku tego wynika, że dla przebadanego i praktycznie występującego zakresu zmienności średnich czasów napraw $\tau < 5$ godz.) oraz proporcji zakłóceń zdarzających się podczas okresu złej pogody do całkowitej liczby zakłóceń, największa rozbieżność wyników nie przekracza wartości 15%, co należy uznać za całkowicie zadawalające.

5. Wybór modelu odwzorowania zmienności pogody

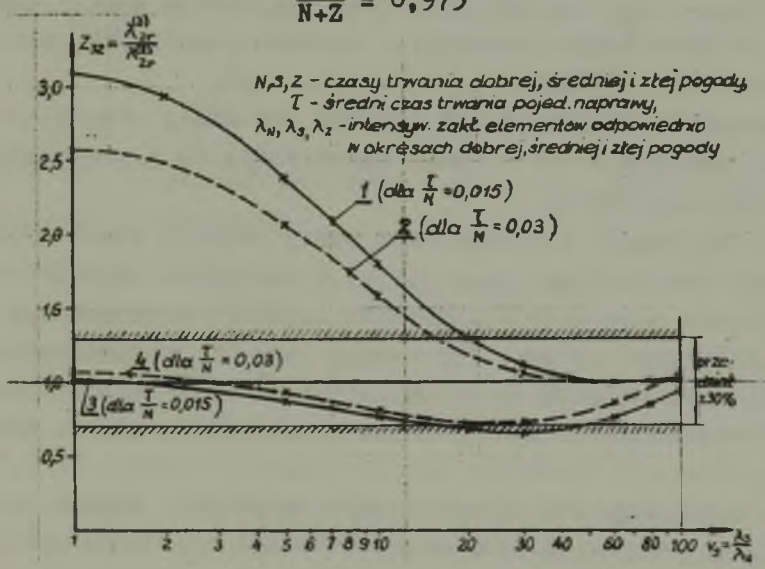
Za podstawę weryfikacji modelu przyjęto wyniki porównawczych analiz szczegółowych, przeprowadzonych na przykładzie układu równoległego 2 jednakowych elementów napowietrznej sieci 110kV, dla praktycznie wchodzącego w grę zakresu zmienności najistotniejszych parametrów. Wyniki tych rozważań pokazano na rysunkach 2, 4 i 5. Rys. 2 przedstawia wykresy zależności ilorazu z_{21} dwóch wartości wypadkowej intensywności analizowanego układu równoległego, obliczonych odpowiednio dla dwustanowego i jednostanowego modelu pogody, od stosunku "v" intensywności zakłóceń dla okresów dobrej i złej pogody $(v = \frac{\lambda_Z}{\lambda_N})$ dla $\tau/N = \sigma =$ = const, i $N/N+Z = \gamma =$ const.

Iloraz z_{21} może być interpretowany - przy przyjęciu modelu dwustanowego jako modelu odniesienia - jako miara krotności błędu obliczenia wypadkowej intensywności zakłóceń badanego układu, popełnianego przy stosowaniu modelu jednostanowego. Iloraz ten rośnie wraz ze wzrostem wartości v, będącej miarą stopnia wrażliwości badanego układu na trudne warunki meteorologiczne oraz ze wzrostem długości okresów trwania złej pogody Z; dla praktycznie występujących w badanej sieci 110 kV zmienności parametrów V, σ i γ może on osiągnąć wartość większą od 10.

Na rys. 4 pokazano zależność z_{21} od wartości parametru σ dla $\gamma =$ const. i v = const. Z przedstawionego wykresu wynika, że zależność ta jest stosunkowo nieznaczna: przy dwukrot-



Rys. 4. Zależność $\frac{\lambda_{2r}^{(2)}}{\lambda_{2r}^{(1)}} = f(\frac{T}{N})$ dla $\frac{\lambda_Z}{\lambda_N} = v = 50$ i dla $\gamma = \frac{N}{N+Z} = 0,975$



Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń intensywności zakłóceń układu równoległego dwóch elementów przy zastosowaniu dwóch różnych modeli zmienności pogody:
trójstanowego ($\lambda_{2r}^{(3)}$) i dwustanowego ($\lambda_{2r}^{(2)}$) (Krzywe 1 i 2 odpowiadają przypadkowi włączenia S do okresu N, 3 i 4 - do okresu Z)

nej zmianie σ, z_{21} zmienia się jedynie o ok. 30%. Wyniki porównawczej analizy zastosowania modeli: trójstanowego i dwustanowego, przedstawiono na rys. 5 w postaci wykresu zależności ilorazu $z_{32} = \lambda_{2r}^{(3)}/\lambda_{2r}^{(2)}$ ($\lambda_{2r}^{(3)}$, $\lambda_{2r}^{(2)}$ - intensywności zakłóceń układu równoległego, obliczone odpowiednio przy założeniu porównywanych modeli pogody) od stosunku intensywności zakłóceń dla okresów średniej i dobrej pogody $\lambda_S/\lambda_N = v_s$, dla γ = const, σ = const i $\lambda_Z/\lambda_N = v_Z$ = const.
Rozpatrywano przy tym 2 możliwości: przyłączenia okresu trwania średniej pogody (S) do okresu złej pogody (Z) lub do okresu dobrej pogody (N), uzyskując w ten sposób 2 przebiegi zależności $z_{32} = f(v_S)$.

Wykonana analiza wykazała, że różnice porównywanych wyników dla modeli trójstanowego i dwustanowego są dużo mniejsze, niż analogiczne różnice dla modeli dwustanowego i jednostanowego. Dla rozpatrywanych zakresów zmienności σ, γ, v_S i v_Z odstępstwa ilorazu z_{32} od jedności przy zaliczeniu okresu średniej pogody do właściwych pozostałych okresów pogodowych nie przekraczały granic $\pm$ 30%.

Jakkolwiek przeprowadzone analizy nie miały charakteru całkowicie ogólnego, to jednak upoważniają do wyciągnięcia następujących wniosków:

1) Przy obliczeniu niezawodności pracy układów sieciowych o ustroju równoległym, pracujących w warunkach napowietrznych, konieczne jest uwzględnianie co najmniej dwustanowego modelu zmienności pogody. Popełniany przy nieuwzględnianiu tego warunku błąd jest istotny i rośnie wraz ze wzrostem stopnia wrażliwości rozpatrywanych elementów na wpływy złej pogody.
2) Wpływ dalszego uściślania modelu zmienności pogody przez zastąpienie modelu dwustanowego modelami wyróżniającymi większą liczbą stanów, jest drugorzędny, uzyskiwane zaś niewielkie zwiększenie dokładności za cenę znacznej komplikacji obliczeń nie usprawiedliwia wprowadzania bardziej skomplikowanych, niż dwustanowy, modeli.

6. Propozycje uproszczonego obliczania niezawodności układów równoległych

Skomplikowana i mało praktyczna postać wzoru (1) skłania do poszukiwań możliwości uproszczenia wynikającego z niego schematu obliczeniowego. Możliwości takie rysują się po bliższej analizie formalnej ww. wzoru oraz na podstawie wyników omówionej w rozdz. 5 liczbowej analizy zachowania się układów równoległych w zmiennych warunkach pogodowych.

Wprowadzając wyżej zdefiniowane oznaczenia γ, σ i v, wzór (1) można przekształcić następująco:

$$\lambda_2^{(2)} = \frac{2\tau}{T}\lambda_N^2\left[\gamma\left(\frac{1}{1+\sigma} + \frac{\sigma}{1+\sigma}v\right) + (1-\gamma).\left(\frac{1-\gamma}{1-\gamma+\gamma\sigma}v^2 + \frac{\gamma\sigma}{1-\gamma+\gamma\sigma}v\right)\right] \tag{2}$$

Wzór na obliczenie λ_2 przy przyjęciu niezmiennych, średniorocznych warunków pogodowych, lecz wyrażony w zależności od parametrów λ_N, γ i v przedstawia się natomiast następująco:

$$\lambda_{2r}^{(1)} = \frac{2\tau}{T}\lambda_N^2\left[\gamma + (1-\gamma)v\right]^2 \tag{3}$$

Z relacji (2) i (3) uzyskuje się bezpośrednio (przez obustronne podzielenie) zależność

$$z_{21} = z = \frac{\lambda_{2r}^{(2)}}{\lambda_{2r}^{(1)}} = f(\gamma, v, \sigma)$$

W określonych warunkach meteorologicznych i dla danego rodzaju elementów sieciowych, parametry γ i v są wielkościami stałymi. Wobec wykazanej uprzednio słabej zależności współczynnika z od zmienności σ (przy γ i v = const.) można z kolei przyjąć, że dla zmian σ nie większych od 100% i z = const.

Założenie stałości współczynnika z pozwala istotnie uprościć obliczenia: można je wtedy przeprowadzać przy pomocy wartości średniorocznych (tzn. bez uwzględnienia zmienności pogody) i mnożyć następnie uzyskany wynik przez ten współczynnik:

$$\lambda_{2r}^{(2)} = \lambda_{2r}^{(1)} \cdot z \qquad (4)$$

Omawiany powyżej współczynnik z został określony dla układu 2 elementów równoległych. W podobny sposób można wyznaczyć analogiczne współczynniki dla większej liczby elementów równoległych. Można przy tym wykazać, że uzyskane dla tych układów współczynniki dają się również przedstawić jako funkcje γ, σ i v i dla określonych warunków pogodowych (γ, v = const.) są słabo zależne od zmienności σ. Wartości tych współczynników dla układów więcejelementowych są z reguły dużo wyższe od rozpatrywanego współczynnika z dla układu dwuelementowego. Dla analizowanego zbioru linii 110 kV współczynnik z_3 dla układu trójelementowego wynosił ok. 180 - wobec podobnej wartości dla układu dwuelementowego $z_2 = z \cong 10$.

Wnioski końcowe

1. Nieuwzględnianie wpływu zmienności pogody w obliczeniach niezawodności pracy równoległych układów sieciowych z elementami napowietrznymi, prowadzi do wielokrotnego przeceniania wskaźników tej niezawodności. Popełniany błąd rośnie ze wzrostem stopnia wrażliwości rozpatrywanych obiektów na zmiany pogody i wraz ze zmniejszaniem się średniego czasu napraw, jest więc szczególnie istotny przy obliczaniu niezawodności pracy równoległych układów, złożonych z linii napowietrznych średnich napięć.

2. Ilościowe uwzględnienie ww. wpływu można oprzeć - z dostateczną dla praktycznych potrzeb dokładnością - na założeniu stałości współczynników korekcyjnych "z". Wartości liczbowe tych współczynników mogą być obliczone według podanych wzorów dla równoległych zgrupowań różnych elementów, pracujących w określonych warunkach pogodowych. Przeprowadzone w ograniczonym zakresie badania dla linii napowietrznych 110kV, pracujących w warunkach górnośląskich i w rej. Krakowa wykazały, że z dostateczną dla potrzeb praktyki dokładnością można pominąć wpływ lokalnych odrębności klimatycznych i ope-

rować w obliczeniach przeciętnymi wartościami omawianych współczynników z_2 i z_3. Uogólnienie powyższego stwierdzenia wymaga jednak przeprowadzenia szerszych badań statystycznych, niezbędnych dla zdobycia ogólnych informacji o występujących w reszcie kraju warunkach pogodowych oraz stopnia wrażliwości poszczególnych rodzajów elementów na zmienność pogody.

LITERATURA

[1] Kuzmin J.F.: Metody raszczietow nadieżnosti elektrosnabżenja, uczitywajuszczyje słuczai razwitia (Izwiestia WUZ,Energetika, 1962, nr 1).

[2] Gaver D.P.: Random Hasard in Reliability Problems (Technometrics, maj 1963, nr 2).

[3] Gaver D.P., Montmeat F.E., Patton A.D.: Power System Reliability. Measures of Reliability and Methods of Calculation (IEEE Transactions, p. III, 1964, nr 2).

[4] Kula M.: Niezawodność zasilania odbiorców z układu elektroenergetycznego (Energetyka, 1967, nr 8).

[5] Billington R., Bollinger K.: Transmission Systems Reliability Using Markov Processes (IEEE Transactions, p.III,1968, nr 1).

[6] Kołakowski T., Kula M.: Analiza przydatności i kompletności dostępnych statystyk awaryjności sieci wysokiego napięcia do obliczeń niezawodności złożonych układów sieciowych (Referat opublikowany w Materiałach Konferencji PAN w Jabłonnej w dniach 29-30.XI.1968 r.).

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОГОДЫ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р е з ю м е

На основе проведённого статистического анализа показано существенное влияние погоды на интенсивность отказов воздушной сети 110 кв. Для принятой модели отображения изменчивости погоды выведены соответствующие формулы расчета результирующей интенсивности отказов параллельных систем. Предложен упрощённый способ учета влияния изменчивости погоды в расчетах надёжности работы параллельных систем.

THE INFLUENCE OF FLUCTUATING WEATHER CONDITIONS ON PARALLEL SYSTEM RELIABILITY CALCULATIONS

S u m m a r y

A significant influence of weather conditions on the outage rate of 110 kV open-wire lines has been statistically proved. For the fluctuating environment model assumed, expressions for calculation of over-all outage rates of parallel systems are derived. An aproximate formula for taking into account the effect of fluctuating weather conditions in parallel system reliability calculations is proposed.

Załącznik 1

Założenia przyjęte przy wyprowadzeniu wzorów na intensywność jednoczesnych zakłóceń 2 elementów równoległych, z uwzględnieniem wpływu zmienności pogody.

Z.1. Założenie dwustanowego modelu zmienności pogody

Z.1.1. Przyjęte założenia wyjściowe

- Wykładnicze rozkłady czasów między kolejnymi zakłóceniami
- " " " napraw
- " " " trwania umownych okresów złej i dobrej pogody
- Założenie, że średnie czasy napraw (τ) i średnie czasy trwania złej pogody (Z) są dużo mniejsze od średnich czasów trwania dobrej pogody (N) i średnich czasów między kolejnymi zakłóceniami w okresie złej pogody (m_z) i dobrej pogody (m_d):

$$\tau \ll N, \quad Z \ll N, \quad \tau \ll m_Z < m_d, \quad Z \ll m_Z < m_d.$$

Z.1.2. Wyprowadzenie wzoru

Rozpatrzono kolejno 4 możliwe sytuacje zakłóceniowe:

a) oba elementy uszkadzają się podczas trwania dobrej pogody,

b) pierwszy element uszkadza się podczas dobrej pogody, drugi zaś w czasie złej,

c) oba elementy uszkadzają się podczas złej pogody,

d) pierwszy element uszkadza się podczas złej pogody, drugi podczas dobrej.

Poszukiwaną intensywność układu równoległego obliczono jako sumę intensywności dla ww. przypadków:

$$\lambda_{2r}^{(2)} = \lambda_a + \lambda_b + \lambda_c + \lambda_d$$

Z.2. Założenie trójstanowego modelu zmienności pogody

Z.2.1. Dodatkowe założenia wyjściowe

- Wykładniczy rozkład czasów między kolejnymi zakłóceniami i czasów napraw w okresie trwania "średniej" pogody.
- Założenie, że okresy złej (burze) i średniej pogody (mgły) nie następują bezpośrednio po sobie i są zawsze przedzielone okresami dobrej pogody.

Przy ww. założeniu, pomiędzy częstością występowania poszczególnych okresów, zachodzi następująca zależność:

$$l_N = l_S + l_Z$$

gdzie:

l_N - liczba okresów dobrej pogody,

l_S - " " średn. "

l_Z - " " złej "

Z.2.2. Wyprowadzenie wzoru

Zastosowano analogiczny sposób wyprowadzenia, jak dla modelu dwustanowego, rozpatrując kolejno siedem możliwych przypadków kombinacji następstw zakłóceń i różnych okresów pogodowych. Z teoretycznie możliwych 9 przypadków nie rozpatruje się przy tym, jako z założenia nieprawdopodobnych, przypadków uszkadzania się elementów w sekwencji okresów złej i średniej pogody.