

JAN POPCZYK

Instytut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów  
Politechniki Śląskiej

## O MODELU PROCESU OBSŁUGI SIECI KABLOWYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ W STANACH AWARYJNYCH

**Streszczenie.** Zwrócono uwagę na konieczność podjęcia badań w zakresie organizacji obsługi sieci kablowych średnich napięć jako jednego ze środków podniesienia pewności pracy tych sieci. Podano propozycję modelu procesu obsługi i wskazano metodę jego rozwiązania. Przedstawiono niektóre wyniki analizy wariantowej modelu.

### 1. Wstęp

Zagadnienie jakości energii elektrycznej w ogóle, a w szczególności pewności dostawy tej energii do odbiorców, w tym również do odbiorców komunalnych, wywołuje z każdym rokiem większe zainteresowanie energetyki. W przypadku odbiorców komunalnych zainteresowanie to wynika niewątpliwie stąd, że odbiorcy ci są w coraz mniejszym stopniu ponosić uciążliwość związane z niskim poziomem pewności ich zasilania. Niski poziom pewności zasilania odbiorców komunalnych jest spowodowany przede wszystkim sieciami rozdzielczymi średnich napięć, a w szczególności liniami średnich napięć. Dlatego też sprawą niezwykle istotną jest wskazanie środków podwyższenia niezawodności pracy sieci rozdzielczych średnich napięć. Do środków takich zaliczyć można przede wszystkim [1,2]:

- obniżenie jednostkowej uszkodzalności linii,
- zmianę struktury i wyposażenia aparaturowego sieci,
- wprowadzenie odpowiednich metod eksploatacyjnych, zarówno technicznych jak i organizacyjnych.

Należy jednak podkreślić, że obniżenie jednostkowej uszkodzalności linii zależy tylko częściowo od energetyki. Np. w zakresie linii kablowych jest to w dużej mierze sprawa jakości samych kabli i osprzętu, a o tej decydują wytwórcy.

Drugi ze środków, zmiana struktury i wyposażenia aparaturowego sieci, jest związany z poważnymi nakładami finansowymi. Poza tym jego stosowanie jest ograniczone również ostrym deficytem kabli, osprzętu, aparatury itd.

Jest jeszcze środek trzeci, środek, na który energetyka ma największy wpływ, wprowadzenie odpowiednich metod eksploatacyjnych. W tym miejscu należy zauważyć, że problemy eksploatacyjne sieci rozdzielczych staną się w przyszłości jednymi z głównych ze względu na bardzo szybki rozwój sieci eksploatowanych przez Zakłady czy Rejony Energetyczne. W związku z tym, jeżeli możliwie szybko nie podejmie się szerszych badań z tego zakresu, to w pewnym momencie służby eksploatacyjne staną wobec trudności, których nie potrafią rozwiązać.

Przykładem takich trudności, który to przykład już obecnie można wskazać, są miejskie sieci kablowe średnich napięć. Otóż za jeden z mierników aktualnie osiagalnych, świadczących o poziomie eksploatacji, a w szczególności o poziomie prowadzenia ruchu w tych sieciach, można uznać w przybliżeniu czas niezdatności uszkodzonych linii kablowych.

W tabeli 1 przedstawiono przeciętne czasy niezdatności (wg statystyki oficjalnej przeciętne "czasy remontu") linii kablowych kolejno dla kraju, ZEOPd, ZE Gliwice, ZE Kraków Miasto i RE Bytom.

Tabela 1

	Przeciętny "czas remontu"
	[h]
Kraj	119
ZEOPd	142
ZE Gliwice	219
ZE Kraków M	61
RE Bytom	356

Dane z 1971 r.

Widać, że różnice czasów są znaczne, a przyczyną tych różnic jest nieprzystosowanie służb eksploatacyjnych w poszczególnych sieciach do zadań, które się przed tymi służbami stawia.

## 2. Poziom prowadzenia ruchu a pewność pracy sieci

Zachodzi pytanie: w jakim związku pozostaje wartość przeciętna czasów niezdatności linii kablowych i pewność pracy sieci? Aby na to pytanie odpowiedzieć, należy ustalić kryterium zawodności oraz omówić strukturę sieci. Za kryterium zawodności pracy sieci przyjęto w artykule syntetyczny wskaźnik zawodności określony w sposób następujący:

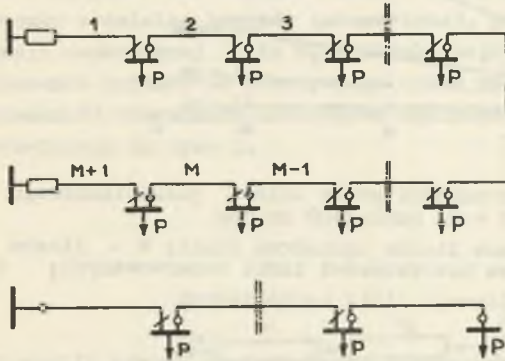
$$q = \frac{\Delta A}{A}, \quad (1)$$

gdzie

$\Delta A$  - energia niedostarczana do węzłów odbiorczych sieci na skutek uszkodzeń w sieci,

$A$  - energia dostarczona do węzłów odbiorczych sieci.

Strukturę miejskich sieci kablowych średnich napięć pokazano w sposób umowny na rys. 1. Podstawowymi układami zasilania w tych sieciach są układy



Rys. 1. Schemat wycinka sieci rejonowej średniego napięcia

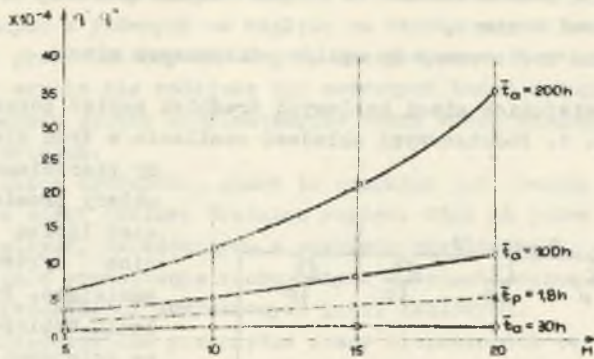
przez czas  $t_p$ , który jest czasem lokalizacji linii uszkodzonej. Oczywiście wtedy nie zachodzi potrzeba natychmiastowego przywracania zdolności linii uszkodzonej, bowiem linia uszkodzona jest rezerwowana przez pozostałe linie w pierścieniu. Dalej czas niezdatności linii rezerwowanych oznacza się przez  $t_a$ . Jeżeli uszkodzenie wystąpi w układzie promieniowym, to wznowienie zasilania wszystkim odbiorcom może nastąpić dopiero po czasie  $t_n$ , który jest czasem niezdatności linii nie rezerwowanych. Należy podkreślić, że przeciętny czas  $\bar{t}_n$  jest znacznie mniejszy od przeciętnych czasów niezdatności podanych w tabeli 1 i jest równy ok. 24 h. Naturalną konsekwencją tego jest często znaczny, w porównaniu z wartościami z tabeli 1 wzrost czasów niezdatności linii rezerwowanych. Wzrost ten nie dokonuje się jednak bezkarnie - prowadzi on do wzrostu prawdopodobieństwa pojawienia się w układzie pierścieniowym dwóch linii niezdatnych. Oczywiście wystąpienie drugiej linii niezdatnej w pierścieniu stwarza sytuację, w której przywrócenie zasilania wszystkim odbiorcom jest możliwe dopiero po naprawie jednej z uszkodzonych linii.

Na rys. 2 pokazano jak się zmienia syntetyczny wskaźnik zawadności pracy układu pierścieniowego spowodowany niezdatnością linii w zależności od przeciętnego czasu niezdatności linii rezerwowanych  $\bar{t}_a$  i liczby odbiorców  $M$  w układzie. Zaprezentowane krzywe (linie ciągłe) uzyskano w oparciu o rozwiązania graniczne procesu narodzin i śmierci.

dy pierścieniowe otwarte i układy promieniowe, chociaż liczba tych ostatnich systematycznie się zmniejsza. Przerwy w zasilaniu odbiorców spowodowane kolejnymi uszkodzeniami znacznie różnią się w zależności od tego, w którym układzie wystąpi uszkodzenie.

Jeżeli uszkodzenie wystąpi w układzie pierścieniowym i jest to jedyne uszkodzenie, to przerwa w zasilaniu odbiorców trwa





Rys. 2. Syntetyczny wskaźnik zawodności pracy układu pierścieniowego dla  $l = 1$  km i  $d = 24$  uszk./100 km rok

$l$  - długość linii;  $d$  - oczekiwana liczba uszkodzeń linii;  $M$  - liczba odbiorców w pierścieniu;  $t_a$  - czas niezdatności linii rezerwowanych;  $t_p$  - czas lokalizacji linii uszkodzonych

Na tym samym rysunku, dla porównania, przedstawiono prostą (linia przerywana) odpowiadającą syntetycznemu wskaźnikowi zawodności spowodowanemu wyłączeniami odbiorców na czas lokalizacji linii uszkodzonych.

Analiza krzywych z rys. 2 i wartości przeciętnych czasów niezdatności podanych w tabeli 1 pozwala sformułować następującą tezę:

"Poważną rezerwą wzrostu poziomu niezawodności pracy sieci kablowych jest w wielu przypadkach skrócenie czasu niezdatności linii rezerwowanych. Skrócenie to można osiągnąć przez odpowiednią organizację systemów obsługi sieci w stanach awaryjnych. Organizacja systemów obsługi musi przy tym uwzględniać potrzeby wynikające z charakterystyk statystycznych strumieni uszkodzeń w poszczególnych sieciach".

Dla przeprowadzenia powyższej tezy należy przede wszystkim:

- 1) określić pojęcie systemu obsługi,
- 2) wykonać wszechstronne badania statystyczne procesu wejścia, a w szczególności strumienia uszkodzeń,
- 3) wybrać metodę rozwiązania modelu procesu obsługi,
- 4) wykonać analizę wariantową systemów obsługi.

### 3. Określenie systemu obsługi

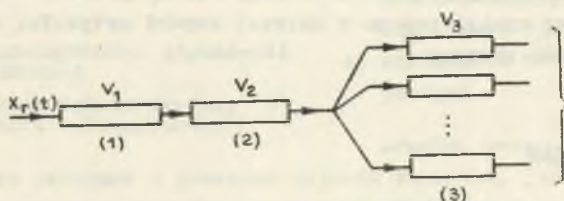
Przez system obsługi rozumie się w niniejszym artykule schemat połączeń stanowisk obsługowych, regulamin pracy poszczególnych stanowisk oraz regulamin obsługi zgłoszeń. Przy tym pod pojęciem "stanowisko obsługowe"

kryje się brygada, a pod pojęciem "zgłoszenie" rozumie się uszkodzenie. Dalej określenia te są używane zamiennie.

Przechodząc do omówienia schematu systemu obsługi należy rozpocząć od ważnego stwierdzenia, że przywrócenie zdatności uszkodzonej linii kablowej wiąże się z przeprowadzeniem:

- lokalizacji uszkodzonej linii,
- lokalizacji punktowej uszkodzenia,
- naprawy linii.

W dużych sieciach wymienione etapy przywracania zdatności realizują z reguły oddzielne brygady (stanowiska), przy czym efektywne czasy lokalizacji uszkodzonej linii  $v_1$  i lokalizacji punktowej uszkodzenia  $v_2$  są znacznie krótsze od efektywnego czasu naprawy linii  $v_3$ . Wynika stąd konieczność rozważenia stosunkowo ogólnego schematu systemu obsługi przedstawionego na rys. 3.



Rys. 3. Ogólny schemat systemu obsługi

Jeżeli system przedstawiony na rys. 3 obsługuje sieć składającą się z pewnej liczby układów pierścieniowych oraz pewnej liczby układów promieniowych, to jest oczywiste, że system ten musi realizować obsługę z uwzględnieniem priorytetu. Problem priorytetu wystąpi przy tym zawsze wtedy, gdy nastąpi uszkodzenie linii nie rezerwowanej, tzn. linii promieniowej, bądź drugiej linii w pierścieniu. Nie mniej ważnym zagadnieniem jak priorytet obsługi jest fakt, że system musi obsłużyć wszystkie zgłoszenia tzn. regulamin obsługi nie może przewidywać odmowy obsługi zgłoszenia.

Z innych, już nie tak ważnych, problemów związanych z regulaminem obsługi, które wymagają uwzględnienia w modelu procesu obsługi można wymienić następujące:

- w jakiej kolejności obsługiwać zgłoszenia tego samego typu (przez zgłoszenie tego samego typu rozumie się np. tylko zgłoszenia uprzywilejowane), jeżeli zgłoszeń takich jest w systemie kilka. Czy w kolejności napływania, czy też w kolejności wynikającej z rosnących wartości czasów obsługi. Wydaje się, że słuszniej jest przyjąć pierwsze wyjście. Uzasadnieniem jest tu fakt, że w praktyce często nie wiadomo z góry, która naprawa będzie trwać najkrócej,

- przy ustaleniu kolejności obsługi zgłoszeń priorytetowych, wtedy gdy tych zgłoszeń jest kilka w systemie, należałoby brać pod uwagę wielkość mocy wyłączanej,
- wtedy, gdy do systemu napływa zgłoszenie priorytetowe, a system obsługuje zgłoszenie zwykłe, należy przewidywać możliwość przerwania obsługi zgłoszenia zwykłego na rzecz zgłoszenia priorytetowego z zaliczeniem wcześniejszego czasu obsługi zgłoszenia zwykłego.

W zakresie regulaminu pracy stanowisk obsługowych do najistotniejszych stwierdzeń należą:

- stanowisko (1) pracuje z reguły w ruchu ciągłym,
- następne stanowiska, tzn. (2) i (3), mogą pracować w ruchu ciągłym, na jedną zmianę z "pogotowiem domowym" lub na dwie zmiany z "pogotowiem domowym". Oczywiście "pogotowie domowe" dotyczy tu tylko zgłoszeń priorytetowych.

W uwagach dotyczących systemu obsługi należy jeszcze wspomnieć, że w analizie, której wyniki podano w dalszej części artykułu, założono całkowitą niezawodność systemu.

#### 4. Proces wejścia

Równie ważnym jak określenie systemu obsługi jest proces wejścia. Z procesem wejścia są związane: strumień uszkodzeń  $x_p(t)$  oraz rozkłady efektywnych czasów obsługi  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$  na stanowiskach (1), (2) i (3).

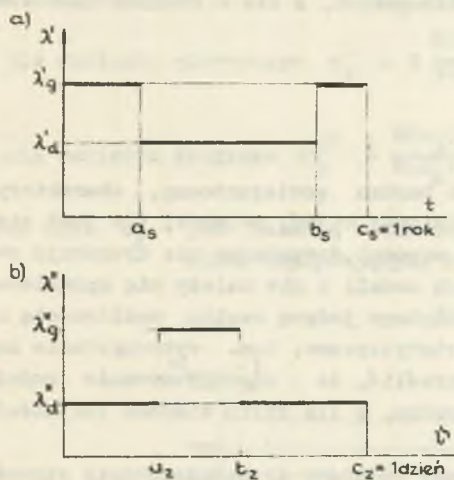
Badania statystyczne przeprowadzone w sieci kablowej ZE-Gliwice wykazały, że z punktu widzenia właściwości strumieni  $x_p(t)$  koniecznym jest wyróżnić trzy przyczyny uszkodzeń linii kablowych, a to:

- obniżenie poziomu izolacji,
- eksploatację górniczą,
- roboty ziemne.

Strumienie spowodowane wymienionymi przyczynami mają przy tym następujące własności<sup>1)</sup>:

<sup>1)</sup> Należy pamiętać, że w artykule rozpatruje się właściwości strumieni z punktu widzenia obsługi masowej, tzn. strumieni w stosunkowo dużych sieciach traktowanych jako "czarne skrzynki". Podane właściwości, zwłaszcza 1) i 4), nie muszą zachodzić jeśli rozpatrywać strumienie uszkodzeń nie w całej sieci, a np. w odrębnych układach zasilających.





Rys. 4. Model intensywności strumienia uszkodzeń

a) sezonowość roczna intensywności; b) zmienność dobową intensywności

$x_r(t)$ , zagadnienie związane z procesem wejścia stanowią, jak to już wcześniej stwierdzono, rozkłady czasów  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$ . Okazuje się, że czasy te nie mają jednakowych rozkładów. Czasy  $v_1$  najlepiej można opisać rozkładem Weibulla. Czasy  $v_2$  mają rozkład dwumodalny. Do ich opisu można użyć dwóch rozkładów o tej samej postaci (mogą to być rozkłady Weibulla, chociaż lepsze są logarytmo-normalne), ale o różnych parametrach. Wreszcie czasy  $v_3$  podlegają rozkładowi normalnemu uciętemu (praktycznie jednak ucięcia nie trzeba uwzględniać).

Powyższe uwagi, dotyczące postaci rozkładów zmiennych  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$ , wynikają z badań statystycznych. Zachodzi jednak pytanie czy uwzględnienie w modelu procesu obsługi czasów  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$  określonych na podstawie przeszłości jest wystarczające. Trzeba bowiem pamiętać, że przy takim podejściu pomija się możliwość aktywnego oddziaływania na omawiane czasy, np. poprzez zmianę technologii, poprzez wyposażenie w lepszą aparaturę, środki transportowe, czy też przez odpowiednią organizację samych brygad. O-tóż podkreślając potrzebę włączenia w przyszłości dopiero co wymienionych czynników do modelu w charakterze zmiennych decyzyjnych, wydaje się, że obecnie nie jest to jeszcze konieczne. Stanowisko takie wynika w szczególności z badań zmiennej  $v_3$ , które ze względu na swoją dużą wartość przeciętną ma decydujące znaczenie. Okazuje się, że przeciętna zmiennej  $v_3$  nie wykazuje trendu malejącego na przestrzeni wielu ostatnich lat. Poza tym główne możliwości w zakresie zmniejszenia czasu niezdatności linii re-

- 1) są niezależne,
- 2) zarówno sezonowość roczna jak i zmienność dobową ich intensywności podlegają modelom dwustanowym, rys. 4,
- 3) w przedziałach o stałej intensywności rocznej (np. w przedziale  $a_s < t < b_s$ , rys. 4) zmienne stanowiące odstęp między kolejnymi uszkodzeniami mają ten sam rozkład, zwykle rozkład Weibulla. Natomiast w przedziałach o stałej intensywności dobowej (np. w przedziale  $a_2 < t < b_2$ , rys. 4) można z reguły przyjąć, że strumienie  $x_r(t)$  są proste,
- 4) strumienia te nie wykazują pamięci.

Drugie, poza strumieniem

zerwowanych kryją się obecnie w organizacji systemów obsługi, przy aktualnej organizacji samych stanowisk obsługowych, a nie w zmianie tych stanowisk.

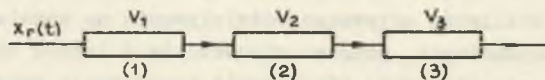
### 5. Metoda rozwiązania modelu

Z przedstawionej, zresztą w sposób bardzo powierzchowny, charakterystyki modelu procesu obsługi sieci kablowej widać, że model ten jest niezwykle skomplikowany. Teoria obsługi masowej dotychczas nie dysponuje rozwiązaniami analitycznymi dla podobnych modeli i nie należy się spodziewać że będzie dysponować w przyszłości. Dlatego jedyną realną możliwością uzyskania rozwiązań jest modelowanie statystyczne, tzn. wykorzystanie metody Monte Carlo. Należy przy tym podkreślić, że zaprogramowanie modelu dla maszyny cyfrowej nie jest zbyt trudne, o ile tylko wiadomo jak modelować strumień  $x_r(t)$ .

W pracy [3] uzasadniono, że z reguły podstawę do zamodelowania strumienia rzeczywistego  $x_r(t)$  w przedziale o stałej intensywności rocznej stanowi strumień Palma. Oczywiście strumień Palma nie wykazuje zmienności dobowej intensywności, ale na bazie tego strumienia można określić inny strumień, który zmienność dobową intensywności będzie już wykazywał.

### 6. Przykładowa analiza systemów obsługi

Dla uzyskania odpowiedniego materiału porównawczego przeanalizowano dwa warianty bardzo prostego systemu obsługi, przedstawionego na rys. 5, realizującego obsługę bez priorytetu. Pierwszy z tych wariantów można scharakteryzować w sposób następujący: stanowisko (1) pracuje w ruchu ciągłym, a stanowiska (2) i (3) pracują na jedną zmianę (od godz. 7<sup>00</sup> do 15<sup>00</sup>). W przypadku drugiego wariantu natomiast wszystkie trzy stanowiska pracują w ruchu ciągłym.



Rys. 5. Schemat systemu obsługi przyjęty w analizie wariantowej

Jedną z ważniejszych charakterystyk wynikowych pracy rozpatrywanego systemu jest linia regresji:

$$E(\bar{t}_a / n_3)$$

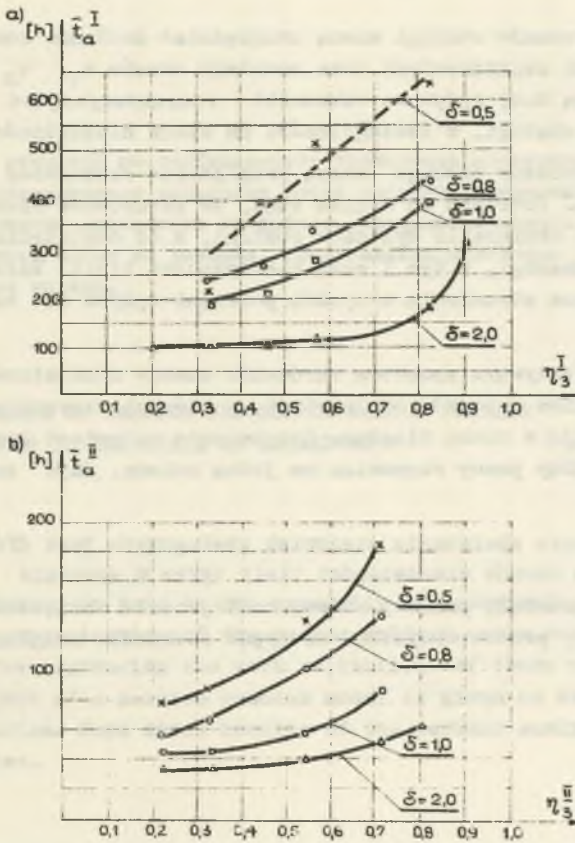


gdzie  $\eta_3$  jest stopniem obciążenia stanowiska (3) obliczonym w sposób następujący:

- dla wariantu pierwszego  $\eta_3^I = 3 \frac{E(v_3)}{E(x_A)}$

- dla wariantu drugiego  $\eta_3^{II} = \frac{E(v_3)}{E(x_A)}$

przy czym  $x_A$  - jest zmienną stanowiącą odstęp między kolejnymi uszkodzeniami napływającymi do systemu.



Rys. 6. Wskaźniki jakości pracy systemu obsługowego dla  $E(v_1) = 1,8$  h,  $E(v_2) = 3,7$  h,  $E(v_3) = 18$  h oraz zmienności dobowej intensywności strumienia  $z = \lambda_g^* / \lambda_d^* = 3$  przy  $a_z = 7^{00}$  i  $b_z = 15^{00}$  (rys. 4)

a) stanowisko (1) (rys. 5) pracuje w ruchu ciągłym, a stanowiska (2) i (3) tylko na jedną zmianę; b) wszystkie stanowiska pracują w ruchu ciągłym

Trzeba tu dodać, że linia regresji  $E(\bar{t}_a/\eta_3)$  stanowi nie tylko miernik jakości pracy systemu obsługi, ale także mówi o niezawodności pracy sieci (rys. 2). A zatem, już tylko na podstawie tych linii, można wnioskować o wpływie organizacji obsługi sieci kablowej średniego napięcia na jej niezawodność.

Na rys. 6 pokazane są linie regresji  $E(\bar{t}_a/\eta_3^I)$  i  $E(\bar{t}_a/\eta_3^{II})$  dla różnych wartości parametru  $\delta$ , tzn. parametru kształtu rozkładu Weibulla, wż którego generowano zmienne  $x_A$ ,  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$ . Z rys. tego wynikają pewne ogólne wnioski.

## 7. Wnioski

1. Modele procesów obsługi muszą uwzględniać dokładne rozkłady czasów między kolejnymi uszkodzeniami oraz rozkłady czasów  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$ , bowiem rozkłady te mają duży wpływ na wskaźniki charakteryzujące bezpośrednio pracę systemów obsługi, w szczególności na czasy niezdatności linii.

2. Modele procesów obsługi muszą uwzględniać sezonowość roczną strumieni uszkodzeń. Potrzeba ta wynika stąd, że sezonowość może w dużym stopniu decydować o obciążeniu systemów obsługi, a od obciążenia zależą wskaźniki jakości obsługi, w tym i czas niezdatności linii. Widać zatem, że sezonowość roczna strumienia w sposób pośredni wpływa na zawodność pracy sieci.

3. Bardzo efektywnym sposobem skrócenia czasów niezdatności linii jest organizacja takich systemów obsługowych, w których wszystkie stanowiska obsługowe pracują w ruchu ciągłym. Zwiększenie natomiast liczby kanałów równoległych, przy pracy stanowisk na jedną zmianę, daje znacznie mniejsze rezultaty.

4. Zmniejszenie obciążenia stanowisk obsługowych jest efektywnym sposobem skracania czasów niezdatności linii tylko w zakresie dużych obciążeń. Przy tym granica, poniżej której zmniejszenie obciążenia nie jest efektywne, zależy przede wszystkim od typów rozkładów uwzględnionych w modelu procesu.

## LITERATURA

1. Ocena pewności pracy krajowej sieci rozdzielczej. Opracowanie IEn nr 9956, 1973 r.
2. Koncepcja rozwoju sieci rozdzielczych do 2000 roku ze szczególnym uwzględnieniem wymaganego stopnia niezawodności zasilania odbiorców oraz zwiększonego tempa spożycia energii elektrycznej w sektorze bytowo-komunalnym i rolnictwie. Opracowanie IEn nr 10107, 1973 r.

3. Popczyk J.: Wpływ organizacji obsługi sieci kablowych średnich napięć w stanach awaryjnych na ich niezawodność (rozprawa doktorska). Politechnika Śląska Gliwice, 1973 r.

Przyjęto do druku w listopadzie 1974 r.

О МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ  
СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В АВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Резюме

Обращен внимание на необходимость проведения исследований в области организации обслуживания кабельных сетей среднего напряжения как одного из средств повышения надежности их работы. Предложена модель процесса обслуживания и указан метод ее решения. Представлены некоторые результаты вариантного анализа модели.

ABOUT THE MODEL OF SERVICE PROCESS OF MEDIUM VOLTAGE  
CABLE NETWORKS IN THE STATE OF BREAKDOWN

Summary

The attention is paid to the necessity of undertaking the research in the service organization of the medium voltage cable networks as one of the means for increasing the work reliability of these networks.

The project of a service process model is given as well as the method of its solution. Some final results of the variant analysis of the model are described.