

Franciszek BUCHTA

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

O EFEKTYWNOŚCI SYGNALIZATORÓW ZWARĆ W SIECIACH KABLOWYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Streszczenie: Przedstawiono propozycję metody badania efektywności sygnalizatorów zwarć w krajowych sieciach kablowych średnich napięć. W metodzie uwzględniono losowość procesu odnowy powaryjnej oraz narastanie obciążeń stacji śn/nn. Przeprowadzono analizę dla przypadku lokalnej sygnalizacji zwarć. Podano ogólne wnioski.

1. WSTĘP

Celowość stosowania sygnalizatorów zwarć w krajowych sieciach kablowych średnich napięć wynika z potrzeby obniżenia niedostarczonej odbiorcom energii elektrycznej. Zagadnienie ważne jest zarówno w odniesieniu do układów istniejących, jak i projektowanych. W tym ostatnim przypadku zastosowanie sygnalizatorów może mieć wpływ na ustalenie optymalnej liczby stacji śn/nn zasilanych z półpętli (obecnie barierą ograniczającą wzrost liczby stacji śn/nn w półpętli jest obniżenie ciągłości zasilania odbiorców, wynikające głównie z trudności lokalizacji uszkodzeń [2]).

Propozycję rozwiązania konstrukcyjnego sygnalizatora zwarć dla sieci kablowych średnich napięć przedstawiono w pracy [1]. Wstępny kosztorys sygnalizatorów wskazuje, że koszt jest zbyt duży, aby można ekonomicznie efektywność ich stosowania przyjąć za oczywistą. Konieczne zatem staje się opracowanie praktycznej metody badania efektywności stosowania sygnalizatorów zwarć, która powinna określić graniczny koszt przy określonej trwałości sygnalizatora oraz sposób rozmieszczenia w sieci.

2. METODA BADAŃ

Niedostarczona energia ΔA , wynikająca z uszkodzeń w sieciach kablowych śn, zależy od wielu zmiennych. Na podstawie wstępnego rozeznania zmienne

te podzielono, dla danego sposobu prowadzenia lokalizacji, na dwie grupy. Do pierwszej grupy zaliczono zmienne sterujące procesu lokalizacji. Są to:

- n - liczba stacji śn/nn w pólpetli,
- l - średnia w pólpetli długość linii śn między stacjami, km,
- λ - średnioroczna intensywność uszkodzeń linii $\frac{1}{100 \text{ km, rok}}$.

Wśród powyższych zmiennych nie ma mocy stacji śn/nn z uwagi na to, że jej wpływ na niedostarczoną energię jest łatwy do określenia w inny sposób, natomiast uwzględnienie mocy znacznie skomplikowałoby obliczenia.

Do drugiej grupy zaliczono zmienne zakłócające proces lokalizacji uszkodzeń. Są to zmienne [8]:

- v_p - przeciętna prędkość przejazdu brygady pogotowia energetycznego w ruchu miejskim, $\frac{\text{km}}{\text{h}}$,
- t_{λ} - czas trwania łączenia próbnego, min. W jego skład wchodzi: czas potrzebny na wyjście z samochodu, wejście do stacji, stwierdzenie braku napięcia, dwie rozmowy z dyspozytorem, nawiązanie łączności przez dyspozytora z obsługą GPZ, otwarcie i zamknięcie łącznika, załączenie linii wyłącznikiem, wyjście ze stacji, wejście do samochodu,
- t_o - czas otwierania (zamykania) łącznika w stanie beznapięciowym, min. Czas ten jest krótszy od czasu t_{λ} o czas nawiązania połączenia radiowego z dyspozytorem i czas otwarcia łącznika,
- t'_{λ}, t'_o - podobnie jak t_{λ} i t_o , jeśli brygada znajduje się już wewnątrz stacji, min,
- t_s - czas sprawdzenia stanu sygnalizatora, min.

W zależności od przyjętego sposobu prowadzenia lokalizacji, oprócz wymienionych zmiennych zakłócających mogą istnieć jeszcze inne.

W analizie efektywności interesująca jest różnica niedostarczonej energii w procesie lokalizacji w sieci bez sygnalizatorów i z sygnalizatorami. Prowadzenie badań statystycznych w sieci rzeczywistej jest z wielu powodów niemożliwe, jednak różnicę tę można wyznaczyć na drodze badań modelowych, korzystając z symulacji procesu odnowy powaryjnej w układzie dyspozytor - przyroda (zasada takiej symulacji omówiona jest w pracach [7, 8]). Zastosowanie symulacji możliwe jest dzięki uwzględnieniu w oceanach ΔA istniejących zakłóceń.

Wybór punktów, w których przeprowadza się symulację procesu odnowy powaryjnej, tzn. wybór kombinacji określonych poziomów zmiennych sterujących należy do teorii statystycznego planowania doświadczeń [3, 5]. Stosowanie metod tej teorii wpływa na znaczne obniżenie liczby koniecznych do wykonania symulacji.

Korzystając z powyższych metod oraz stosując analizę regresji, można wartość oczekiwaną różnicy, przypadającą na jedno uszkodzenie, przedstawić ogólnie w postaci wielomianu

$$\Delta A' = P(\beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 l + \beta_3 \lambda + \beta_{11} n^2 + \beta_{22} l^2 + \beta_{33} \lambda^2 + \beta_{12} nl + \beta_{13} n\lambda + \beta_{23} l\lambda + \beta_{123} nl\lambda + \dots) \text{ [kW}\cdot\text{h]} \quad (1)$$

gdzie:

P - przeciętna w ciągu roku moc wyłączona na skutek powstania uszkodzenia dla jednej stacji śn/nn, stała w pólpetli, kW,

β - współczynnik regresji.

Określenie stopnia wielomianu (1) oraz istotnych współczynników regresji należy do analizy wariancji [3, 5].

Roczny zysk w zł, wynikający ze stosowania sygnalizatorów, można wyznaczyć jako

$$K_{\Delta A'} = \Delta A' k_{\Delta A}, \text{ [zł]} \quad (2)$$

gdzie $k_{\Delta A}$ - jednostkowy koszt niedostarczonej energii, $\frac{\text{zł}}{\text{kW}\cdot\text{h}}$.

Uwzględniając narastanie obciążeń stacji koszt ten w roku t można obliczyć następująco

$$K_{\Delta A'}(t) = (1+q)^t \Delta A' k_{\Delta A}, \text{ [zł]} \quad (3)$$

gdzie q - przyrost roczny zużycia powierzchniowego energii.

Podstawą do ilościowej oceny zysku (3) jest suma zdyskontowanych na rok zerowy zysków rocznych

$$\sum_{t=0}^T K_{\Delta A'}(t) d^{-t} = K^d, \quad (4)$$

gdzie:

T - trwałość sygnalizatorów, lata,

$d=(1+p)$ - stopa dyskonta (p jest stopą rozszerzeniową, obecnie przyjmuje się dla całej gospodarki $p=0,08$).

Kryterium ekonomicznej efektywności stosowania sygnalizatorów jest następujące:

$K_S^d(n) < K_{\min}^d(n) \Rightarrow$ zastosowanie sygnalizatorów we wszystkich n stacjach jest ekonomicznie uzasadnione,

$K_S^d(n) > K_{\max}^d(n) \Rightarrow$ zastosowanie sygnalizatorów we wszystkich n stacjach jest ekonomicznie nieuzasadnione,

gdzie:

$K_B^d(n)$ - koszt inwestycyjny powiększony o zdyskontowany na rok zerowy koszt eksploatacyjny sygnalizatorów zastosowanych we wszystkich n stacjach, zł,

$$K_{\min}^d(n) = k^d(P_0, n, l_{\min}, \lambda_{\min}),$$

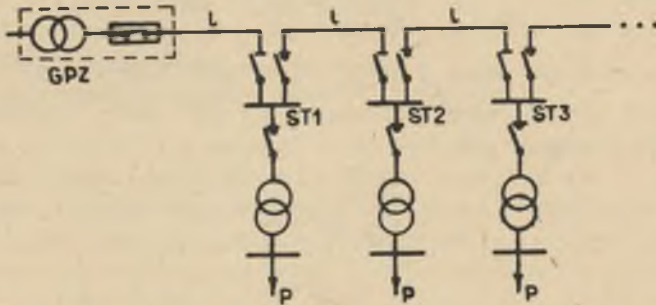
$K_{\max}^d(n) = K^d(P_0, n, l_{\max}, \lambda_{\max})$ - minimalny oraz maksymalny zysk zdyskontowany na rok zerowy.

Jeśli $K_{\min}^d(n) \leq K_B^d(n) \leq K_{\max}^d(n)$ należy wtedy obliczyć zysk zdyskontowany (4) dla konkretnej sieci, w której planuje się zastosowanie sygnalizatorów.

3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METODY

Z a ł o ż e n i a

a. Symulacja procesu lokalizacji uszkodzeń wykonywana jest w sieci przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Schemat analizowanej półpętli kablowej śn

- b. Lokalizacja uszkodzeń prowadzona jest wg optymalnej strategii ze względu na niedostarczoną energię (równoważna jej jest strategia maksymalnej informacji [9]).
- c. Lokalizacja uszkodzeń bez użycia sygnalizatorów prowadzona jest metodą łączy próbnych, bez ograniczenia liczby tych łączy.
- d. Sygnalizacja przepływu prądu zwarcioowego dokonywana jest lokalnie (sygnał nie jest przesyłany do RDR). Zakłada się, że sygnał jest wyprowadzony na sewnątrz stacji śn/nn.
- e. Sygnalizatory reagują na wszystkie rodzaje zwarć.

- f. Brygada objazdowa dokonująca łączeń w GPZ dostępna jest bez opóźnień.
- g. Poziomy, dolny i górny, zmiennych sterujących procesu lokalizacji podano w tabl. 1. W tabelicy podano także przedziały dla zmiennych zakłócających.

Tablica 1

Przedziały zmienności poszczególnych zmiennych

Zmienna	n	l	λ	v_p	t_z	t_o	t'_z	t'_o	t_s
	-	km	$\frac{100 \text{ km, rok}}{h}$	$\frac{\text{km}}{h}$	min	min	min	min	min
Poziom dolny	4	0,3	20	10	4	2	2,5	0,3	0,2
Poziom górny	10	0,5	30	20	6	3	3,5	0,7	0,8

- h. Prawdopodobieństwa warunkowe wystąpienia uszkodzenia linii kablowej w poszczególnych porach doby lub roku przedstawiono w tabelicy 2 [6].

Tablica 2

Prawdopodobieństwa warunkowe wystąpienia uszkodzenia linii kablowej w poszczególnych porach

a) doby

b) roku

Godzina	Prawdopodobieństwo
0 - 5	0,1
6 - 7	0,2
8 - 14	0,4
15 - 21	0,2
22 - 23	0,1

Miesiąc	Prawdopodobieństwo
I - II	0,25
III - VI	0,39
VII - XII	0,36

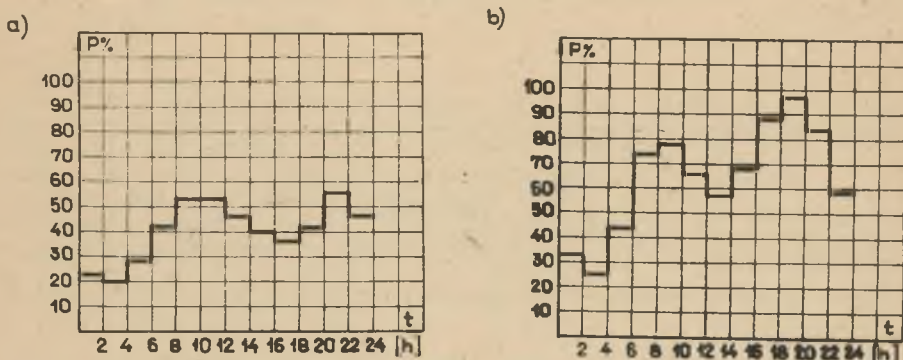
- i. Obciążenie stacji śn/nn w lecie i zimie przedstawiono na rys. 2.

Wykresy wykonano w oparciu o pracę [4]. Zakładano stałość wykresów w każdym roku.

- j. Obciążenie stacji śn/nn w jesieni oraz na wiosnę przyjęto jako średnie z obciążenia w lecie i zimie.

k. Przyrost roczny zużycia powierzchniowego energii $q = 8\%$.

l. Jednostkowy koszt niedostarczonej energii $k_{\Delta A} = 25 \frac{\text{zł}}{\text{kW}\cdot\text{h}}$.



Rys. 2. Typowe wykresy obciążenia odbiorców miejskich a) w lecie; b) w zimie

(P% = 100% odpowiada obciążeniu szczytowemu stacji śn/nn)

W y n i k i

Wykonanie wstępnej analizy dało podstawę do tego, aby sądzić, że niedostarczona energia $\Delta A'$ zależy nie tylko wprost od zmiennych n , l , λ , ale również od ich drugich potęg (wielomian (1) stopnia drugiego). Wykonano zatem kompozycyjne planowanie ortogonalne drugiego rzędu [3, 5]. Planowanie to dla zmiennych standaryzowanych (przyjmujących na granicznych swych poziomach wartości +1 i -1) przedstawiono w tabelicy 3.

Tabela 3

Kompozycyjne planowanie ortogonalne drugiego rzędu

x_0	n_s	l_s	λ_s	$n_s^2 -$ -0,72	$l_s^2 -$ -0,72	$\lambda_s^2 -$ -0,72	$n_s l_s$	$n_s \lambda_s$	$l_s \lambda_s$	$\overline{\Delta A'}$ [kW·h]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
+1	+1	+1	+1	0,28	0,28	0,28	+1	+1	+1	3,10 P
+1	+1	+1	-1	0,28	0,28	0,28	+1	-1	-1	2,07 P
+1	+1	-1	+1	0,28	0,28	0,28	-1	+1	-1	1,86 P
+1	+1	-1	-1	0,28	0,28	0,28	-1	-1	+1	1,24 P
+1	-1	+1	+1	0,28	0,28	0,28	-1	-1	+1	0,25 P
+1	-1	+1	-1	0,28	0,28	0,28	-1	+1	-1	0,16 P
+1	-1	-1	+1	0,28	0,28	0,28	+1	-1	-1	0,15 P
+1	-1	-1	-1	0,28	0,28	0,28	+1	+1	+1	0,10 P
+1	-1,215	0	0	+0,72	-0,72	-0,72	0	0	0	0,07 P
+1	+1,215	0	0	+0,72	-0,72	-0,72	0	0	0	2,78 P
+1	0	-1,215	0	-0,72	+0,72	-0,72	0	0	0	0,57 P
+1	0	+1,215	0	-0,72	+0,72	-0,72	0	0	0	1,07 P

cd. tablicy 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
+1	0	0	-1,215	-0,72	-0,72	+0,72	0	0	0	0,62 P
+1	0	0	+1,215	-0,72	-0,72	+0,72	0	0	0	1,02 P
+1	0	0	0	-0,72	-0,72	-0,72	0	0	0	0,82 P

¹⁾ Jeśli P w kW

n_B, l_B, λ_B - zmienne standaryzowane [3,5],

x_0 - zmienna fikcyjna przyjmująca stałe +1 [3,5],

$\frac{x_0}{\Delta A'}$ - wartość średnią z dwóch symulacji.

Dla zrealizowania tego planowania potrzebne są wartości $\overline{\Delta A'}$. Wartości te wyznaczono korzystając z symulacji procesu odnowy poswaryjnej, przy czym dla każdej kombinacji zmiennych (wiersze w tabl. 3) wykonano dwie symulacje, z których wyznaczono wartość średnią $\overline{\Delta A'}$.

Stosując metody z teorii regresji wyznaczono w oparciu o dane zestawione w tabl. 3 następujący wielomian

$$\Delta A' = P(2,888 - 0,879n - 3,000l - 4,667\lambda + 0,041n^2 + 0,800nl + 1,267n\lambda), \text{ [kWh]} \quad (6)$$

W wielomianie tym wszystkie współczynniki regresji są istotne na poziomie $\alpha = 0,05$, a współczynnik korelacji wielowymiarowej [3] $R = 0,99$ jest istotny na poziomie $\alpha = 0,01$.

Poszczególne współczynniki regresji posiadają następujące odchylenia standardowe:

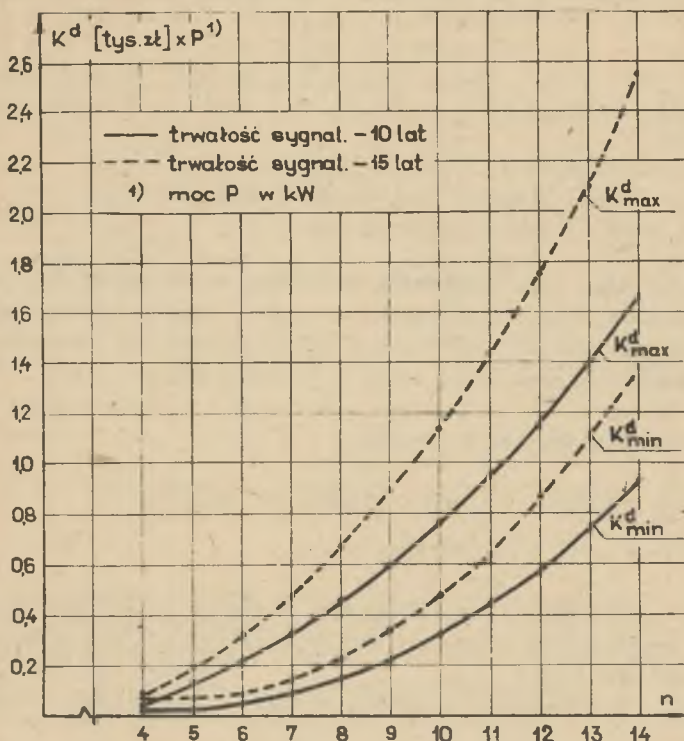
$$\begin{aligned} \sigma\{\beta_0\} &= 0,117, & \sigma\{\beta_{1i}\} &= 0,075 \\ \sigma\{\beta_{1j}\} &= 0,047, & \sigma\{\beta_{1j}\} &= 0,054. \end{aligned}$$

Moc P dla przyjętych założeń h), i), j) wyznaczono jako

$$P = 0,562 P_{Bz} \text{ [kW]}, \quad (7)$$

gdzie P_{Bz} - średnia ze szczytowych mocy stacji w półpętli, kW.

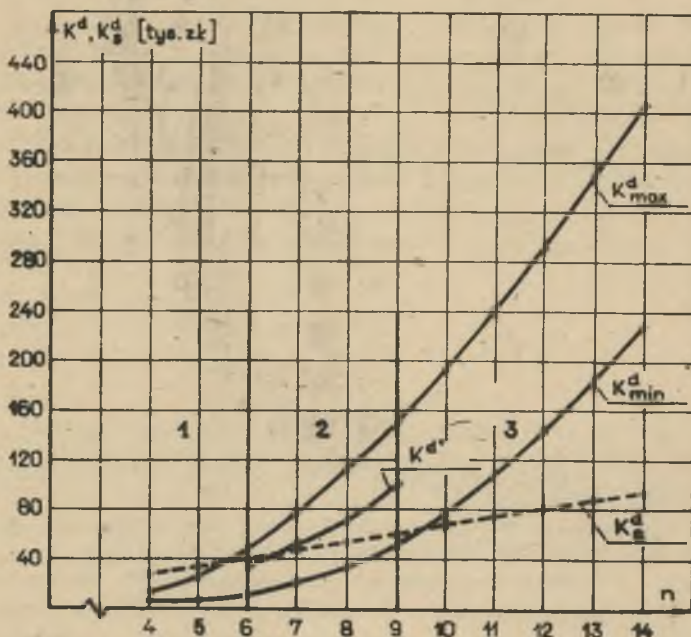
Zysk K_{min}^d oraz K_{max}^d dla poszczególnych liczb stacji przedstawiono w postaci wykresów na rys. 3. Wykresy te wykonano dla dwóch trwałości sygnalizatorów - 10 i 15 lat. Dla poszczególnych trwałości sygnalizatorów obszar znajdujący się pod krzywą K_{min}^d (rys. 3) charakteryzuje, zgodnie z kryterium (5), ekonomicznie uzasadnioną opłacalność stosowania sygnalizatorów, natomiast obszar znajdujący się nad krzywą K_{max}^d charakteryzuje ekonomiczną nieopłacalność stosowania sygnalizatorów.



Rys. 3. Zysk K^d_{min} oraz K^d_{max} , wynikający ze stosowania sygnalizatorów w zależności od liczby stacji \acute{s} n/ n

Przykładową analizę szczegółową przeprowadzono dla mocy $P_{sz} = 300$ kW, nakładem inwestycyjnym na sygnalizatory $5000 \frac{zł}{1 \text{ stacja}}$ oraz trwałości $T = 15$ lat. Roczne koszty eksploatacyjne oszacowano w oparciu o pracę [4] jako 4% od nakładu inwestycyjnego. Wyniki tej analizy przedstawiono w postaci wykresów na rys. 4.

Na rysunku tym zaznaczono trzy obszary. W obszarze 1, tzn. dla 4 i 5 stacji w półpętli, sygnalizatory nie przynoszą ekonomicznych korzyści, w obszarze 3, tzn. dla $n \geq 10$ stosowanie sygnalizatorów jest korzystne, przy czym korzyść ta jest tym większa, im więcej jest stacji w półpętli. W obszarze 2, tzn. dla liczby stacji 6+9, konieczne jest obliczenie zysku K^d dla rzeczywistych długości l oraz intensywności uszkodzeń λ . Jeśli, przykładowo, założymy przeciętne $l=0,4$ km oraz $\lambda = 25 \frac{1}{100 \text{ km rok}}$, to otrzymana się w tym obszarze krzywą oznaczoną jako K^d' . Zatem sygnalizatory będą przynosić ekonomiczne korzyści, począwszy od 7 stacji w półpętli.



Rys. 4. Zyski K^d oraz koszt K_s^d sygnalizatorów w zależności od liczby stacji $6n/nn$

4. UWAGI KOŃCOWE, WNIOSKI

Przyjęcie założenia a), b) oraz f) powoduje, że wykonana analiza odnosi się do przypadku uszkodzeń pojedynczych lub wielokrotnych wtedy, kiedy dysponuje się odpowiednią liczbą brygad pogotowia energetycznego. W przypadku, kiedy liczba uszkodzeń jest większa od liczby brygad, dyspozytor powinien kierować się optymalną strategią ze względu na czas lokalizacji uszkodzeń. Strategia ta, minimalizująca czas lokalizacji jednego uszkodzenia, w efekcie zapewnia w całej sieci minimum niedostarczonej odbiorcom energii elektrycznej. Przyjęcie założenia b) powoduje, że przeciętny roczny zysk czasu, wynikający ze stosowania sygnalizatorów w półpełni, nie przekracza kilku minut.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować następujące ogólne wnioski:

1. Zastosowanie sygnalizatorów lokalnych wobec dużego ich kosztu (wg [1] ok. 5000 $\frac{zł}{stacja}$) musi poprzedzać analiza ekonomiczna efektywności ich stosowania.

2. W sieciach, dla których ciągłość zasilania odbiorców jest szczególnie mała (w sieciach o dużej liczbie stacji, długości i intensywności uszkodzeń linii), zastosowanie sygnalizatorów znacznie obniża wartość niedostarczonej odbiorcom energii elektrycznej.
3. Przeprowadzona przykładowa analiza szczegółowa wskazuje na przydatność zaproponowanej metody badania efektywności sygnalizatorów do zastosowań praktycznych.
4. Konieczne jest prowadzenie dalszych badań, uwzględniających inne kryteria prowadzenia lokalizacji uszkodzeń oraz inne możliwości stosowania sygnalizatorów (np. sygnalizatory tylko w niektórych stacjach, sygnalizacja centralna itp.). Celowe byłoby poszerzenie tych badań na sieci terenowe śn.

LITERATURA

- [1] HORAK J. i inni: Opis urządzenia do sygnalizacji lokalnej toru przepływu prądów zwarcia w sieciach kablowych (sygnalizacja lampką na zewnątrz stacji śn/nn). Politechnika Częstochowska (praca nie publikowana), Częstochowa 1978.
- [2] HORAK J.: Możliwość i efekty skracania czasu ogólnej lokalizacji uszkodzeń w sieciach kablowych. Energetyka nr 10, 1979.
- [3] MAŃCZAK K.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1976.
- [4] MEJRO CZ.: Podstawy gospodarki energetycznej. WNT, Warszawa 1974.
- [5] NALIMOW W.W., CZERNOWA N.A.: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych. WNT, Warszawa 1967.
- [6] POPCZYK J.: O strumieniu uszkodzeń w rozdzielczych sieciach kablowych średniego napięcia. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, Elektryka z. 37, 1972.
- [7] POPCZYK J.: Proces odnowy peawaryjnej w napowietrznych sieciach rozdzielczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 66, 1979.
- [8] POPCZYK J. i inni: Optymalne warunki prowadzenia ruchu w miejskiej sieci rozdzielczej. IESU Politechniki Śląskiej (praca nie publikowana), Gliwice 1980.
- [9] PRUSS W.L., NICZYPOROWICZ Ł.B.: Ispolzowanije ECWM dla formirowanija optimalnogo uprawlenija processom awarijnoj diagnostiki w raspriedielitelnyh elektrosietiach 6-10 kV. IWUZ Energetika nr 5, 1971.

Wpłynęło do redakcji 5.III.1981 r.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski

О ЭФФЕКТИВНОСТИ СИГНАЛИЗАТОРОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ
В КАБЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 20 КВ

Р е з ю м е

В статье предложен метод исследования эффективности сигнализаторов коротких замыканий в отечественных кабельных сетях 20 кв. В методе учтены случайность процесса послеаварийного восстановления и нарастание нагрузок подстанций 20/0,4 кв. Проведен анализ для местной сигнализации коротких замыканий. Представлены общие выводы.

ON EFFECTIVENESS OF THE SHORT CIRCUIT SIGNALS
IN MEDIUM VOLTAGE CABLE NETWORKS

S u m m a r y

The paper offers a method of effectiveness investigation of the short circuit signals in Polish medium voltage cable networks. In the method randomness of post failure renewal procedure and load incrising in medium (low voltage stations) were taken into consideration. A case of local signaling of short circuit was analysed. The general conclusions were presented.