

FRANCISZEK SZYMIK, JAN POPCZYK,
KURT ŻMUDA

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

O OPTYMALIZACJI PROCESU LOKALIZACJI USZKODZEŃ W SIECIACH REJONOWYCH

Streszczenie. Zwrócono uwagę na dużą zazwyczaj ilość możliwości prowadzenia lokalizacji uszkodzonego odcinka sieci napowietrznej średniego napięcia za pomocą łączy próbnych. Podano dla pewnej sieci reguły optymalnego sterowania procesem lokalizacji ze względu na dwa kryteria: czas trwania procesu oraz wartość niedostarczonej odbiorcom energii. Przedstawiono wyniki przykładowej analizy przeprowadzonej w oparciu o zaproponowane reguły sterowania.

1. Wstęp

Rozważmy sieć rejonową średniego napięcia, której wycinek składający się z linii (pod tym określeniem rozumie się pień wraz z odgałęzieniami do punktów rozcięt w stanie normalnym), transformatorów i aparatury łączniowej pokazano na rys. 1. Każde uszkodzenie trwałe w takim wycinku prowadzi do wystąpienia przerw w zasilaniu odbiorców, przy tym wartość energii niedostarczonej odbiorcom można przedstawić jako sumę:

$$\Delta A = \Delta A_0 + \Delta A_{11} + \Delta A_{12} + \Delta A_n + \Delta A_p, \quad (1)$$

gdzie:

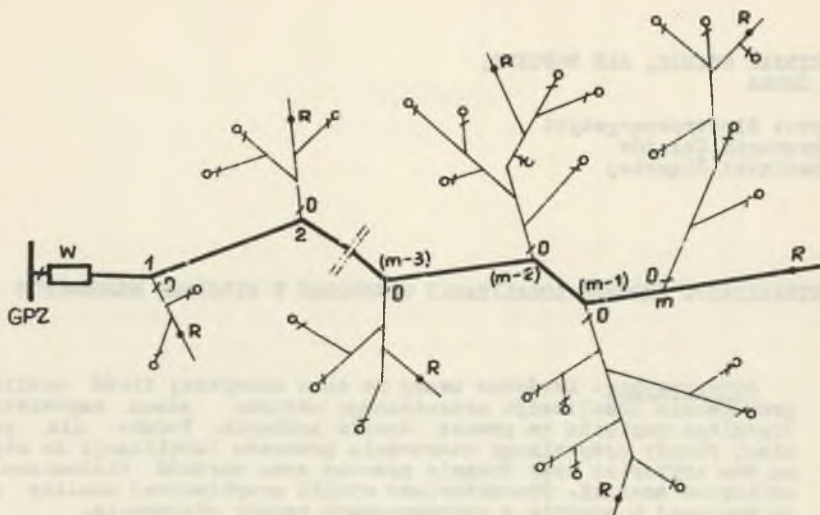
ΔA_0 - energia niedostarczona na skutek opóźnienia rozpoczęcia lokalizacji (opóźnienie to może wynikać z czasu dojazdu brygad, z braku wolnych brygad, czy wreszcie z konieczności oderwania brygad od prac planowych),

ΔA_{11} - energia niedostarczona na skutek lokalizacji uszkodzonego odcinka za pomocą przełączy,

ΔA_{12} - energia niedostarczona w czasie lokalizacji punktowej (w czasie obchodu zlokalizowanego odcinka),

ΔA_n - energia niedostarczona w czasie napraw,

ΔA_p - energia niedostarczona na skutek przełączy po naprawie.



Rys. 1. Schemat wycinka sieci rejonowej średniego napięcia

Wyróżnienie powyższych składników odpowiadających kolejnym etapom przywracania stanu normalnego w sieci jest celowe ze względu na różną specyfikę tych etapów. Np. lokalizacja odcinka uszkodzonego jest procesem podlegającym optymalizacji w warunkach niepewności. W związku z tym określenie składnika ΔA_{11} w badaniach modelowych sieci jest najciekawszym, obok analizy składnika ΔA_0 , problemem teoretycznym. Jego rozwiązanie zazwyczaj jest jednak bardzo trudne i w związku z tym składnik ΔA_{11} wyznacza się często przy założeniu sztywnej strategii lokalizacji, która nie gwarantuje nawet optymalności pierwszego kroku procesu. Tak uczyniono w pracy [3] poświęconej praktycznie w całości analizie energii niedostarczonej w procesie lokalizacji. Dlatego podjęcie tematyki z przedstawionego zakresu wydaje się konieczne, tym bardziej, że jak wykazują badania, [1], składnik ΔA_{11} ma zawsze istotny, a często decydujący, wpływ na wartość sumy ΔA . Uzyskanie rozwiązań optymalizujących proces lokalizacji w różnorodnych sieciach (nie załatwia tego oczywiście niniejszy artykuł) pozwoli przede wszystkim:

- prawidłowo wyznaczać wartość składnika ΔA_{11} we wszelkich badaniach modelowych sieci, a ponadto
- stworzyć skuteczne narzędzie pracy dla dyspozytorów kierujących lokalizacją uszkodzeń (obecnie dyspozytorzy są skazani wyłącznie na własną intuicję i doświadczenie).

2. Model sieci. Cpis procesu lokalizacji

Założmy, że:

- 1) wyposażenie sieci w telemechanikę ogranicza się do telesygnalizacji zbiorczej doziemień,
- 2) wyposażenie sieci w automatykę lokalną ogranicza się do automatyki SPZ-1 lub SPZ-2 sterującej wyłącznikami liniowymi,
- 3) brak jest w sieci urządzeń (wskaźników) dodatkowych do lokalizacji uszkodzeń,
- 4) łączniki R, w stanie normalnym otwarte, (rys. 1), pozwalają na łączenie prądów roboczych (mogą to być rozłączniki, albo odłączniki o odpowiedniej zdolności załączalnej i odłączalnej). Ponadto łączniki R stanowią punkty umożliwiające zasilanie drugostronne odgałęzień. Łączniki O na początku odgałęzień są natomiast zwykłymi odłącznikami pozwalającymi na wykonywanie łączeń tylko w stanie beznapięciowym.

Założmy dalej, że proces lokalizacji realizuje jedna brygada (monter oraz kierowca z uprawnieniami) pod kierownictwem dyspozytora i przyjmijmy, że proces rozpoczyna się w GPZ-cie (GPZ jest bez stałej obsługi).

Pozornie mogłoby się wydawać, że przy powyższych ograniczeniach, idealizujących w dużym stopniu sieć i system obsługowy, sterowanie procesem lokalizacji nie powinno przedstawiać kłopotu. Okazuje się jednak, że nawet w tym przypadku istnieje wielka liczba możliwych strategii i nie jest wcale oczywiste, które z nich są lepsze, a które gorsze z punktu widzenia określonego kryterium (czasu trwania procesu, energii niedostarczonej, długości drogi przebytej przez brygadę itd.).

Przyjmijmy następujące oznaczenia:

- k - kolejny krok w procesie lokalizacji, $k = 0, 1, \dots, n$. Na każdy krok z wyjątkiem zerowego, składa się łączenie próbne zwiększające ilość informacji o miejscu uszkodzenia oraz przełączenia wynikające z uzyskanej informacji
- o - otwarcie (w stanie beznapięciowym) łącznika O,
- z - zamknięcie (w stanie beznapięciowym) łącznika O,
- r - odłączenie odgałęzienia za pomocą łącznika R,
- w - załączenie odgałęzienia za pomocą łącznika R,
- zP_2^1 - łączenie próbne za pomocą wyłącznika W, przy czym 1 oznacza, że w załączonej części linii jest uszkodzenie, natomiast 2, że nie ma uszkodzenia,
- M - zbiór wszystkich odgałęzień,
- M' - zbiór M pomniejszony o jedno (ostatnie próbowane) odgałęzienie,
- S - zbiór odgałęzień sprawdzonych w k krokach procesu,
- S' - zbiór odgałęzień sprawdzonych w (k-1) krokach procesu.

Powyższe oznaczenia pozwalają dla analizowanej sieci opisać w stosunkowo przejrzysty sposób niektóre z możliwych do realizacji strategii lokalizacji. Przykładowo mogą to być strategie:

strategia I

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{GPZ} - o(i \in M) \end{array} \right\} \quad k = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LP}_2^1 \left\{ \begin{array}{l} w(k) - o(i \in M \setminus S) - \text{koniec} \\ \bigwedge_{i \in S'} r(i) - \bigwedge_{i \in S'} z(i) - \text{koniec} \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad k = 1, 2, \dots, n$$

strategia II

$$\left\{ \text{GPZ} - o(i \in M) \right\} \quad k = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LP}_2^1 \left\{ \begin{array}{l} z(k) - o(i \in M \setminus S) \\ \text{koniec} \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad n < m$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LP}_2^1 \left\{ \begin{array}{l} \bigwedge_{i \in M'} o(i) - \bigwedge_{i \in M} w(i) \\ \text{koniec} \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad k = n; \quad n = m$$

strategia III

$$\left\{ \text{GPZ} - \bigwedge_{i \in M} o(i) \right\} \quad k = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LP}_2^1 \left\{ \begin{array}{l} \bigwedge_{i \in M} w(i) - \text{koniec} \\ z(i \in M) \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad k = 1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LP}_2^1 \left\{ \begin{array}{l} o(k) - \bigwedge_{i \in M \setminus S} z(i) - \text{koniec} \\ z(i \in M \setminus S) \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad k = 2, 3, \dots, n$$

Poza podanymi przykładami można podać szereg innych jeszcze strategii lokalizacji. Można np. w kolejnych krokach sprawdzać nie pojedyncze odgałęzienia, a kilka odgałęzień. Wtedy liczba możliwości gwałtownie rośnie. Trzeba również pamiętać, że oprócz wielkiej liczby możliwych strategii, w

sensie jak wyżej, istnieje jeszcze problem optymalizacji "wewnątrz" określonej strategii. Tu liczba możliwości sterowania procesem jest jeszcze większa. Dlatego też wydaje się, że jedyną drogą gwarantującą uzyskanie efektywnych rozwiązań w zakresie optymalizacji procesu lokalizacji w całości jest:

- 1) znalezienie reguł sterowania optymalnego "wewnątrz" poszczególnych strategii oraz
- 2) wybór strategii na drodze wariantowej (tym bardziej, że w przypadku konkretnej sieci często udaje się z góry wyeliminować niektóre strategie jako nieoptymalne, co zmniejsza zakres koniecznej analizy wariantowej i tym samym czyni ją możliwą do przeprowadzenia).

W dalszej części artykułu podjęto próbę rozwiązania pierwszego z postawionych zadań, przy tym dla zilustrowania najważniejszych zagadnień związanych z poszukiwaniem reguł sterowania optymalnego posłużono się strategią I (strategia ta stwarza dużo ciekawych problemów z teoretycznego punktu widzenia).

3. Optymalizacja procesu lokalizacji ze względu na czas jego trwania

Oznaczmy przez $T(k,i)$ czas trwania k -tego kroku związanego ze sprawdzeniem i -tego odgałęzienia. Czas ten jest równy:

$$T(k,i) = 2t + t [GPZ, O(i \in M)], \quad k = 0$$

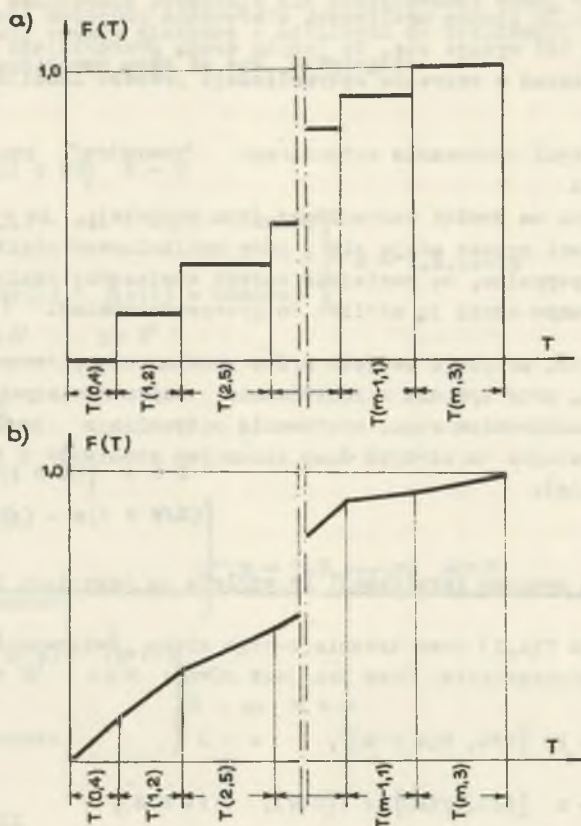
$$T(k,i) = 3t + t [GPZ, R(k)] + t [R(k), O(i \in M \setminus S)] +$$

$$+ t [O(i \in M \setminus S), GPZ], \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

gdzie:

- t - czas trwania czynności łączeniowej (razem z wyjściem z samochodu, dojściem do łącznika oraz powrotem do samochodu),
- $t[...]$ - czas przejazdu brygady między łącznikami (punktami) odpowiadającymi wykazowi indeksów zawartemu w nawiasie. Czas ten należy obliczać z zależności $t[...] = \frac{cL[...]}{v}$, gdzie c jest współczynnikiem określającym stosunek długości drogi kołowej łączącej dwa punkty do odległości geometrycznej tych punktów, $L[...]$ jest odległością, a v - szybkością przejazdu brygady.

Czasy $T(k,i)$ w dalszych rozważaniach będziemy traktować jako wielkości deterministyczne. Mimo to całkowity czas trwania lokalizacji jest zmienną losową. Oznaczmy tę zmienną przez T . Przy deterministycznym charakterze czasów $T(k,i)$ zmienna T może przybierać tylko wartości dyskretne spośród dowolnych sum wartości $T(k,i)$.



Rys. 2. Przykład funkcji rozkładu czasu trwania procesu lokalizacji

Na to, aby w jasny sposób można było przedstawić ideę optymalizacji procesu lokalizacji uszkodzonego odcinka uczynimy pewne założenie nie powodujące większego błędu, a niezwykle istotne z teoretycznego punktu widzenia. Założenie to polega na zastąpieniu wzoru (2) dla $k = 1, 2, \dots, n-1$ wzorem następującym:

$$T(k, i) = \sim T(i) = 3t + 2t[GPZ, 0(i \in M \setminus S)], \quad k=1, 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

Wtedy kwantyl 100% zmiennej T jest równy sumie $\sum_{i=1}^m T(i)$, a przykład funkcji rozkładu $F(T)$ tej zmiennej jest pokazany na rys. 2a lub nieco inaczej na rys. 2b (ten ostatni sposób jest korzystniejszy ze względu na ciągłość funkcji).

Ponieważ dokonujemy optymalizacji procesu ze względu na czas jego trwania zatem rozsądnie jest przyjąć za funkcję celu wartość oczekiwaną czasu trwania procesu. Wiadomo, że wartość oczekiwaną zmiennej losowej można wyrazić poprzez wartość ciągłej funkcji rozkładu za pomocą wzoru:

$$E(T) = \int_{-\infty}^{\infty} T dF(T). \quad (4)$$

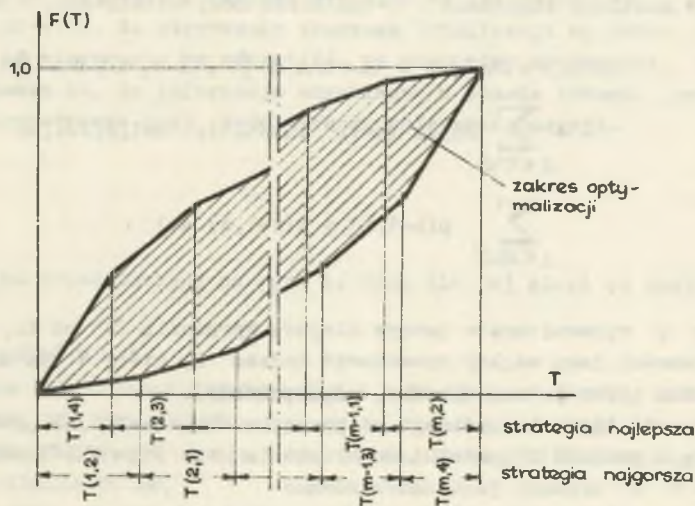
Biorąc ostatni wzór za podstawę można stwierdzić, że optymalizację procesu lokalizacji zapewnia warunek:

$$\frac{p(k, i \in M \setminus S)}{T(k, i \in M \setminus S)} = \max, \quad k=0, 1, \dots, n-1, \quad \sum_{i \in M \setminus S} p(k, i) + p(k, d) \quad (5)$$

gdzie:

$p(k, i)$ - prawdopodobieństwo uszkodzenia i -tego odgałęzienia wyznaczone na etapie k -tego kroku procesu,

$p(k, d)$ - prawdopodobieństwo uszkodzenia pnia linii na etapie k -tego kroku procesu.



Rys. 3. Przykład zakresu optymalizacji procesu lokalizacji ze względu na czas jego trwania

Na rys. 3 pokazano w jakim zakresie jest możliwa optymalizacja procesu lokalizacji w pewnym konkretnym przypadku.

Na zakończenie należy jeszcze dodać, że sterowanie procesem lokalizacji w przypadku kiedy minimalizacji podlega czas jego trwania nie ma charakteru adaptacyjnego. Można bowiem wykazać, że zachodzi:

$$\frac{p(k-1,i)}{p(k-1,j)} = \frac{p(k,i)}{p(k,j)}, \quad i \in M \setminus S, \quad j \in M \setminus S, \quad k=1,2,\dots,n-1. \quad (6)$$

6. Optymalizacja procesu lokalizacji ze względu na wartość niedostarczonej energii

Sterowanie procesem lokalizacji uszkodzeń zapewniające minimum niedostarczonej energii odbiorcom musi uwzględniać trzy zmienne związane z każdym z odczepów: moc $P(i \in M)$ pobieraną z i -tego odgałęzienia w stanie normalnym, prawdopodobieństwo $p(k, i \in M \setminus S)$ uszkodzenia i -tego odgałęzienia zmieniające się w trakcie trwania procesu oraz czas $T(i \in M)$ trwania kroku procesu związanego ze sprawdzeniem i -tego odgałęzienia. Te trzy zmienne, z których każda ma istotny wpływ na przebieg procesu, powodują, że wszelkie próby sterowania procesem oparte tylko na intuicji prowadzą do dużych błędów.

Dla sformułowania kryterium optymalności zauważmy, że w każdym $(k-1)$ -ym kroku procesu wybieramy określone odgałęzienie, którego sprawdzenie daje nadzieję włączenia w k -tym kroku mocy oczekiwanej o wartości:

$$\begin{aligned} \Delta P(k, i \in M \setminus S') &= P(i \in M \setminus S') [1 - p(k-1, i \in M \setminus S')] + \\ &+ \sum_{j \in M \setminus S} P(j) p(k-1, i \in M \setminus S'), \quad k=1,2,\dots,n, \\ \sum_{j \in M \setminus S'} p(k-1, j) + p(k-1, d) &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

(indeks j wprowadzono w pewnym miejscu wyrażenia (7) po to, aby uniknąć dwuznaczności jaką mógłby spowodować indeks i , który w tym akurat miejscu oznacza tylko jedno, wybrane, odgałęzienie).

Wykonaniełączenia próbnego na początku kroku $k=1,2,\dots,n-1$ zamienia nadzieję w pewność i prowadzi do włączenia mocy $P(i \in S \setminus S')$. Suma mocy włączonych w k krokach jest zatem równa:

$$P(k) = \sum_{i \in S} P(i), \quad k = 1,2,\dots,n-1 \quad (8)$$

Pozostaje jeszcze określić jak w wyniku realizacji kolejnych kroków zmienia się wartość oczekiwana mocy, która pozostaje do włączenia w sieci

do zakończenia procesu. Uwzględniając (7) i (8) można napisać, że moc ta na etapie (k-1)-ego kroku jest równa:

$$\Delta P(k) = \sum_{i \in M \setminus S'} P(i) - \sum_{i \in M \setminus S'} P(i)p(k-1,i), \quad k=1,2,\dots,n$$

$$\sum_{i \in M \setminus S'} p(k-1,i) + p(k-1,d) = 1 \quad (9)$$

Wyrażenia (7) i (9) pozwalają wyliczyć na etapie (k-1)-ego kroku wartość oczekiwaną energii niedostarczonej odbiorcom w wyniku realizacji k-tego kroku procesu. Jest:

$$\Delta A(k, i \in M \setminus S') = [\Delta P(k) - \Delta P(k, i \in M \setminus S')] T(k, i \in M \setminus S'), \quad k=1,2,\dots,n \quad (10)$$

Ostatecznie więc zasadę optymalnego sterowania procesu lokalizacji ze względu na minimum niedostarczonej energii można sformułować w sposób następujący:

$$\Delta A(k, i \in M \setminus S') = \min, \quad k = 1,2,\dots,n \quad (11)$$

Należy jeszcze podkreślić, chociaż wynikało to już wcześniej z budowy wzorów od (7) do (10), że sterowanie procesem lokalizacji wg wzoru (11), w odróżnieniu od sterowania wg wzoru (5), ma charakter sterowania adaptacyjnego. Oznacza to, że informacje uzyskiwane w czasie trwania procesu muszą być wykorzystywane przy podejmowaniu kolejnych decyzji.

5. Przykład

Rozważmy sieć przedstawioną na rys. 1. Dane dla tej sieci są następujące:

- liczba odgałęzień $m = 5$,
- moce pobierane z kolejnych odgałęzień (od 1 do 5) są równe: 200 kW, 600 kW, 100 kW, 100 kW, 200 kW
- długości odgałęzień (od 1 do 5): 5 km, 10 km, 15 km, 10 km, 10 km,
- długość pnia linii: 20 km,
- odległości z GPZ-u do kolejnych łączników 0 (od 1 do 5): 2 km, 5 km, 7 km, 12 km, 15 km,
- współczynnik $c = 1,5$,
- szybkość przejazdu brygady $v = 30$ km/h,
- czas trwania czynności łączeniowej $t = 0,1$ h.

Optymalna dla tej sieci strategia lokalizacji ze względu na czas trwania procesu polega na sprawdzaniu odgałęzień w kolejności: 3-2-1-4-5. Oczekiwany czas trwania procesu wynosi wtedy $\bar{T} = 3,0$ h (w obliczeniach nie uwzględniono czasu przełączeń mających na celu powrót do układu normalnego po znalezieniu odcinka uszkodzonego tzn. nie uwzględniono kroku "LP2- $\bigwedge_{i \in S'} r(i) - \bigwedge_{i \in S'} z(i) - \text{koniec}$ " w procesie lokalizacji wg strategii 1).

Dla porównania najgorsza strategia, polegająca na sprawdzaniu odgałęzień w kolejności: 5-4-1-2-3 daje oczekiwany czas lokalizacji równy $\bar{T} = 4,3$ h.

Optymalna strategia lokalizacji ze względu na wartość niedostarczonej odbiorcom energii polega na sprawdzaniu odgałęzień w kolejności: 2-1-3-4-5. Oczekiwana wartość niedostarczonej energii wynosi dla tej strategii $\Delta \bar{A}_{11} = 1900$ kWh.

Dla najgorszej strategii polegającej na sprawdzaniu odgałęzień w kolejności: 5-4-3-2-1 oczekiwana wartość niedostarczonej energii wynosi 4800 kWh.

6. Zakończenie

Z przeprowadzonej analizy widać, że sterowanie optymalne procesem lokalizacji odcinka uszkodzonego w sieci napowietrznej średniego napięcia za pomocą łączeń próbnych jest zagadnieniem skomplikowanym, często znacznie bardziej skomplikowanym niż np. w pierścieniowych sieciach kablowych [2]. Przyczyną jest zazwyczaj urozmaicona konfiguracja sieci napowietrznych i duża różnorodność wyposażenia tych sieci w aparaturę łączeniową (zarówno w sensie rodzaju łączników jak i miejsca ich zainstalowania).

Z drugiej strony optymalizacja procesu lokalizacji w sieciach napowietrznych, jak to widać z przeprowadzonych przykładowo obliczeń oraz wyników uzyskanych w pracy [1], ma znaczenie praktyczne i powinna z tego powodu być uwzględniana w badaniach modelowych sieci oraz w bieżącym prowadzeniu ruchu. Trzeba przy tym podkreślić, że w badaniach modelowych jest w zasadzie możliwość uwzględnienia rozwiązań optymalnych dla dowolnych założeń odnośnie grafików obciążeń oraz intensywności uszkodzeń. W przypadku natomiast bieżącego prowadzenia ruchu dyspozytor musi dysponować dla poszczególnych linii gotowymi schematami prowadzenia procesu lokalizacji (ze względu na dużą czasochłonność obliczeń). Istnieje w związku z tym możliwość uwzględnienia co najwyżej kilkuwartościowych modeli obciążeń oraz kilkuwartościowych modeli intensywności uszkodzeń. Optymalizacja procesu lokalizacji w czasie rzeczywistym (z uwzględnieniem rzeczywistych chwilowych obciążeń i rzeczywistych chwilowych intensywności uszkodzeń) będzie możliwa dopiero na etapie kompleksowej automatyzacji sieci z maszynami cyfrowymi pracującymi w systemie on-line i wykorzystującymi dane te-

lemetryczne o obciążeniach w sieci (wtedy programy optymalizacji wchodziłyby w skład systemu komputerowego). Wcześniej jednak są konieczne dalsze badania merytoryczne nad optymalizacją procesu lokalizacji w innych sieciach niż ta, którą przeanalizowano w artykule.

LITERATURA

1. Popczyk J.: Optymalizacja organizacji i wyposażenia służb eksploatacyjno-ruchowych utrzymujących urządzenia sieciowe w gotowości ruchowej w nawiązaniu do automatycznego prowadzenia ruchu sieci, cz. I. Politechnika Śląska, Gliwice 1974 (praca nie publikowana).
2. Pruss W.Ł., Nicziporowicz Ł.W.: Ispolzowanie ECWM dla formirovaniia optimalnogo upravleniia processom awariinoj diagnostiki w raspriedelitelnykh elektrosietiax 6-10 kV. Energietika-Izvestiia Wysszhich Uchebnykh Zawiedenij, 1971/5.
3. Skonieczny J., Mrowiec H.: Program oceny warunków ciągłości zasilania odbiorców w liniach terenowych średniego napięcia. Opracowanie Instytutu Energetyki nr NS-527/74, Katowice 1974.

Przyjęto do druku w marcu 1975 r.

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОИСКА ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПЯЖЕНИЯ

Резюме

Авторы обращают внимание на то, что существуют различные возможности поиска поврежденного участка воздушной сети путем применения многократной подачи напряжения на этот участок.

Для определенной сети приводятся принципы оптимального управления процессом поиска поврежденного участка: с точки зрения длительности этого процесса и величины недоотпуска электроэнергии потребителям.

Изложены результаты примерного анализа, проведенного на основе предложенных принципов управления.

THE DAMAGES LOCALIZATION PROCESS OPTIMIZATION IN OVERHEAD MEDIUM VOLTAGE AREA NETWORKS

S u m m a r y

There is a lot of localization possibilities of the damaged part of the medium voltage overhead network by test connections.

The rules of the optimal control of the localization process are given for a certain overhead network considering two criteria: the duration of the process and the value of energy unsupplied to consumers. The results of an analysis carried out for an example basing on the proposed rules are given.