ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1982
Seria: ELEKTRYKA z. 78 Nr kol. 712

Szymon CIURA
Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

MODEL MATEMATYCZNY DO ANALIZY ZAGROŻENIA POŻAROWEGO KABLI PRACUJĄCYCH W TUNELACH KABLOWYCH

Streszczenie: W artykule zaproponowano model matematyczny do analizy zagrożenia pożarowego kabli elektroenergetycznych, pracujących w tunelach kablowych. Wykonano przykładowe obliczenia tego zagrożenia i przedstawiono możliwości praktycznego wykorzystania zaproponowanego modelu.

1. WPROWADZENIE

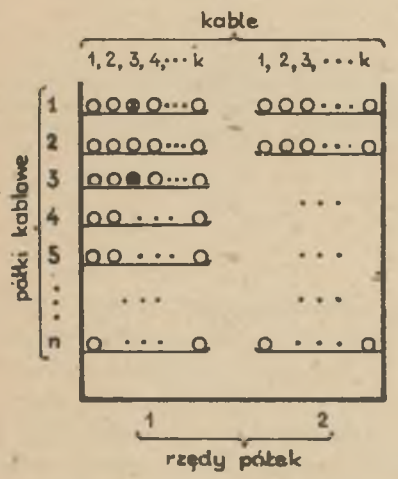
Przy ocenie ciągłości zasilania obiektów przemysłowych dużego znaczenia nabiera zagadnienie zagrożenia pożarowego kabli. Powszechne wprowadzenie do eksploatacji kabli i przewodów w izolacji i powłokach z polichlorku winylu i polietylenu spowodowało bowiem wzrost tego zagrożenia, zwłaszcza dla kabli układanych w zamkniętych tunelach kablowych [1,3,4]. Wymienione tworzywa zawierają związki węgla i wodoru, co powoduje wzrost ich palności, zależnie od wprowadzonych do ich struktury związków innych pierwiastków.

Wskutek niewyłączenia prądu zwarciowego lub znacznego przeciążenia kabla prądem roboczym temperatura kabla i jego otoczenia podnosi się. W warunkach działania podwyższonej temperatury następuje termiczny rozkład tworzywa, z którego zbudowana jest powłoka i izolacja kabla. W wyniku tego rozkładu następuje wydzielanie się chloru i wodoru. Szybki wzrost temperatury zamkniętej przestrzeni tunelu lub kanału kablowego powoduje, że rozkład termiczny ulega przyspieszeniu, rozkładowi ulegają również tworzywa kabli sąsiednich. Wydzielane są duże ilości wodoru, gaszące własności chloru są już niewystarczające i kable zaczynają się palić. Zamknięta przestrzeń tunelu lub kanału sprzyja szybkiemu nagrzaniu otoczenia do temperatury fazy płomieniowej, pożar obejmuje swym zasięgiem nowe, sąsiednie kable, zapalające się tym szybciej, im bardziej zanieczyszczona jest ich powierzchnia [1, 3, 4]. Zagrożenie pożarowe kabli pracujących w

zamkniętych przestrzeniach zależy więc ściśle między innymi od sposobu ułożenia tych kabli, odległości pomiędzy nimi, liczby kabli i rodzaju ich warstwy zewnętrznej [144]. Poniżej przedstawiono próbę analitycznego określenia zagrożenia pożarowego kabli, którego źródłem są pożary pozostałych kabli, pracujących we wspólnym tunelu kablowym.

2. TEORETYCZNE PODSTAWY ANALIZY

Załóżmy, że w tunelu kablowym po obu jego stronach (w dwu rzędach) rozmieszczonych jest n półek kablowych, a na każdej z nich ułożonych jest k kabli wysokiego napięcia (rys. 1). Przyjmijmy, że u_z uszkodzeń lub przeciążeń każdego z tych kabli prowadzi do jego zapalenia się. Po zapaleniu się jednego z kabli (na rys. 1 - kabla zaczernionego), wskutek oddziaływania cieplnego lub bezpośrednio płomieniem, zapalają się od niego najbliższe kable, ułożone po obu jego stronach (na rys. 1 - kable 2 i 4). Od kabli tych zapalają się kolejne kable sąsiednie (1 i 5), aż pożar obejmie swym zasięgiem wszystkie kable na określonej półce kablowej. Z półki tej pożar podobnie przenosi się na półki sąsiednie - wg rys. 1 na półki 2 i 4, a następnie - na półki 1 i 5, na półkę 6 itd., aż zapalą się wszystkie kable, rozmieszczone na n półkach kablowych. Stąd pożar może rozprzestrzenić się na kable z sąsiedniego rzędu półek (wg rys. 1 - na kable z rzędu 2).



Rys. 1. Sposób rozmieszczenia kabli w tunelu kablowym:
● - kabel stanowiący źródło pożaru,
⊖ - kabel o analizowanym zagrożeniu pożarowym

Powyższy mechanizm rozprzestrzeniania się pożarów można przyjąć, jeśli na poszczególnych półkach kablowych umieszczone są azbestowe podkładki, na których układane są kable. W przypadku braku tych podkładek mogłoby bowiem dojść do wcześniejszego zapalenia się kabli z sąsiednich półek kablowych, niż sąsiednich kabli z tej samej półki, na której został zainicjowany pożar. W takim przypadku analiza stałaby się bardzo trudna i praktycznie niewykonalna, ale można by z całą pewnością stwierdzić, że zagrożenie pożarowe kabli wzrosłoby wielokrotnie.

Liczbę B_p pożarów dowolnego z kabli, powstałych wskutek zapalenia się w omówiony wyżej sposób pozostałych kabli z rozpatrywanego tunelu kablowego, można wyznaczyć z ogólnego wzoru

$$B_p = d \cdot u_z (b_k + u_p \cdot b_p + u'_p \cdot u'_r \cdot b_r) \left[\frac{1}{\text{rok}}\right], \qquad (1)$$

w którym[1]:

- d - intensywność uszkodzeń i przeciążeń, mogących stanowić przyczynę pożarów kabli, pracujących w tunelach kablowych, w $\frac{1}{\text{linię} \cdot \text{rok}}$;
- u_z - udział uszkodzeń i przeciążeń kabli, powodujących ich zapalenie się;
- b_k - liczba pożarów kabla o analizowanym zagrożeniu pożarowym, powstałych wskutek oddziaływania pozostałych k-1 kabli, gdy każdy z nich był jeden raz źródłem pożaru;
- b_p - liczba pożarów kabla o analizowanym zagrożeniu pożarowym, powstałych wskutek oddziaływania palących się kabli na pozostałych n-1 półkach kablowych, pod warunkiem, że wszystkie kable na każdej z tych półek zapaliły się jeden raz;
- u_p - częstość występowania pożarów wszystkich k kabli, ułożonych na jednej z n-1 półek kablowych (wg rys. 1 - półki 2÷n), pod warunkiem, że każdy z tych kabli był jeden raz źródłem pożaru;
- u'_p - częstość występowania pożarów wszystkich k kabli, ułożonych na jednej z n półek kablowych w sąsiednim rzędzie półek (na rys. 1 - w rzędzie 2), pod warunkiem, że każdy z tych kabli był jeden raz źródłem pożaru;
- b_r - liczba pożarów kabla o analizowanym zagrożeniu pożarowym, powstałych wskutek zapalenia się jeden raz wszystkich n·k kabli z sąsiedniego rzędu półek kablowych (wg rys. 1 - kabli z rzędu 2);
- u'_r - częstość występowania pożarów wszystkich n·k kabli sąsiedniego rzędu półek (oznaczenie j.w.) w przypadku, gdy k kabli na każdej z n tych półek zapaliło się jeden raz.

Liczbę b_k pożarów wyznacza się, rozpatrując wszystkie możliwe oddziaływania pomiędzy palącymi się kablami na określonej półce kablowej, zgodnie z przyjętym mechanizmem rozprzestrzeniania się pożaru. Wartość ta zależy od miejsca ułożenia kabla na półce (kable zewnętrzne lub leżące pomiędzy innymi kablami) oraz od liczby k kabli, umieszczonych na tej półce. Oznaczmy zatem przez $p_1, p_2, p_3, \ldots p_w$ prawdopodobieństwo zapalenia się sąsiedniego kabla od palących się odpowiednio 1,2,3,...w kabli na określonej półce kablowej. Oznaczmy również przez z=1,2,...m,...k kolejne kab-

[1] Dla lepszego zrozumienia definicji poszczególnych wielkości ze wzoru (1) poniżej przytacza się je w oparciu o rys. 1 (dla kabla oznaczonego krzyżykiem).

k = 5 , m = 3 :

z = 1: (l = 1) $p_1 p_2$

z = 2: (l' = 1) $p_1 + p_1(p_2 - p_1)$

z = 4: (l' = 1) $p_1 + p_1(p_2 - p_1)$

z = 5: (l = 1) $p_1 p_2$

$$b_k(3,5) = 4p_1p_2 + 2p_1 - 2p_1^2$$

k = 5 , m = 5:

z = 1: (l = 1) $p_1 p_2 p_3 p_4$

z = 2: (l = 2)

$$p_1^2 p_3 p_4 + 2p_1(p_2 - p_1)p_3 p_4$$

z = 3: (l' = 2)

$$p_1^2 p_3 + p_1^2 p_3(p_4 - p_3) + 2p_1(p_2 - p_1)p_3 + 2p_1(p_2 - p_1)p_3(p_4 - p_3)$$

z = 4: (l' = 1) $p_1 + p_1(p_2 - p_1)$

$$b_k(5,5) = b_k(1,5) = 5p_1p_2p_3p_4 + 2p_1p_2p_3 + p_1p_2 + p_1 + p_1^2p_3^2 + 2p_1^2p_3p_4 - p_1^2p_3 - p_1^2 - 2p_1p_2p_3^2$$

Rys. 2. Sposób określenia liczby b_k pożarów dla m=3 i m=5 przy k=5 kabli. Na rysunku oznaczono: ●, ⊗ - jak na rys. 1, p_1 - kierunek przenoszenia się pożaru z prawdopodobieństwem p_w, ◯ - kolejne etapy rozwijania się pożaru

le, ułożone na tej samej półce i przeanalizujemy, jak na rys. 2, wszystkie możliwości zapalenia się m-tego kabla od pozostałych k-1 kabli, będących kolejno źródłem pożaru. Na podstawie tej analizy wynika ogólny wzór do wyznaczania liczby pożarów b_k m-tego kabla:

$$b_k(m,k) = \sum_z \left[2^{l-1} \left\{ 1 - \sum_{i=2}^{l \geq 2} \left[\frac{p_a}{p_{a+1}} \cdot \prod_{j=1}^{l \geq 2} \left(1 - \frac{p_b}{2p_{b+1}}\right) \right] \right\} \left(\prod_{w=1}^{m-1} p_w \right) + \right.$$

$$\left. + 2^{l'-1}(1 - p_c + p_{c+1}) \left\{ 1 - \sum_{i=2}^{l' \geq 2} \left[\frac{p_a}{p_{a+1}} \cdot \prod_{j=1}^{l' \geq 2} \left(1 - \frac{p_b}{2p_{b+1}}\right) \right] \right\} \left(\prod_{w=1}^{c} p_w \right) \right], \quad (2)$$

$l = z \wedge z \leq \frac{m}{2}$ oraz $l = k-z+1 \wedge z > \frac{k+m}{2}$,

$l' = m-z \wedge \frac{m}{2} < z \leq m-1$ oraz $l' = z-m \wedge \frac{k+m}{2} \geq z > m$,

$a = 2i-3$,

$b = 2j-1$,

$c = 2l'-1$,

$\frac{p_b}{p_{b+1}} = 1 \wedge b > l$ oraz $\frac{p_b}{p_{b+1}} = 1 \wedge b > l'$.

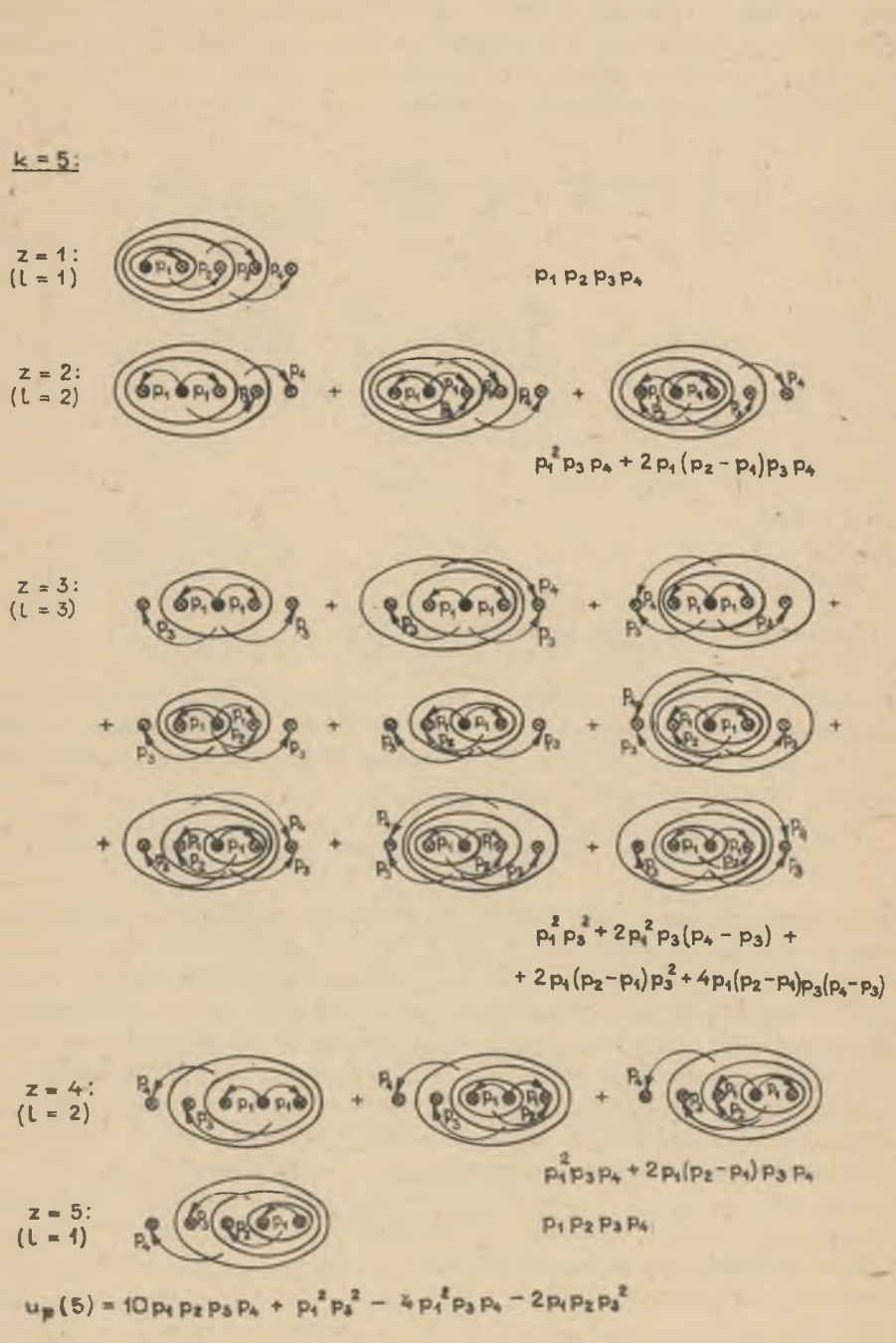
Wartość prawdopodobieństwa p_w zależy między innymi od tzw. obciążenia ogniowego trasy i rośnie wraz ze wzrostem liczby kabli, objętych pożarem [1÷3]. Jeśli przyjąć zaproponowany w pracy [5] wykładniczy model "siły" pożaru, wartość tę można określić jako

$$p_w = \exp(w \cdot \lambda_w) - 1, \quad (3)$$

przy czym wartość p_w jest ograniczona od góry, zatem jeśli $\exp(w \cdot \lambda_w) > 2$, należy przyjmować $p_w = 1$.

We wzorze (3) λ_w jest parametrem o charakterze intensywności inicjacji pożaru, zależnym między innymi od rodzaju kabli i ich podatności na zapalenie się, a dla kolejnych etapów rozprzestrzeniania się pożarów - odpowiednio od wzajemnej odległości kabli na półce, odległości pomiędzy poszczególnymi półkami kablowymi, odległości pomiędzy rzędami półek oraz zastosowanej w każdym przypadku izolacji przeciwogniowej.

Częstość warunkowa u_p i u'_p występowania pożarów wszystkich kabli na półce kablowej zależy tylko od liczby tych kabli i można ją określić podobnie jak liczbę b_k pożarów, co zobrazowano na rys. 3. Dla k kabli na półce otrzymuje się zatem ogólny wzór:



Rys. 3. Sposób określenia częstości u_p powstawania pożaru k=5 kabli. Przyjęto oznaczenia jak na rys. 2

$$u_n(k) = \left(\prod_{w=1}^{k-1} p_w\right) \sum_{z=1}^{k} \left[2^{l-1} \left\{ 1 - \sum_{i=2}^{l\geq 2} \left[\frac{p_a}{p_{a+1}} \cdot \prod_{j=i}^{l\geq 2} \left(1 - \frac{p_b}{2p_{b+1}}\right) \right] \right\} \right], \qquad (4)$$

$l = z \wedge z \leq \frac{k}{2}$ oraz $l = k - z + 1 \wedge z > \frac{k}{2}$,

$a = 2i-3$

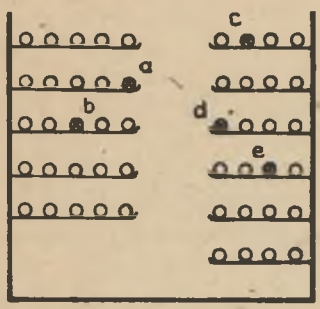
$b = 2j-1$,

$\frac{p_b}{p_{b+1}} = 1 \wedge b > 1$.

Podobnie też można wyznaczyć częstość występowania pożarów u'_r kabli na wszystkich półkach kablowych, zastępując we wzorze (4) liczbę k kabli liczbą n półek kablowych. Prawdopodobieństwa p_w związane zatem będą wtedy z k, 2k, 3k,...wk, palącymi się kablami (w oznacza tutaj liczbę półek objętych pożarem). Na podstawie wzoru (2) można zaś, przy powyższym założeniu, wyznaczyć liczbę pożarów $b_n(m,n)$ wszystkich kabli, umieszczonych na m-tej półce kablowej (z=1,2,...,m,...n określa teraz numer półki). Wzór (2) umożliwia również określenie liczby pożarów $b_r(m,r)$, a wtedy z określa numer rzędu r półek kablowych. Zwykle w tunelu kablowym znajdują się r=2 rzędy półek kablowych, jednak często liczba tych półek nie jest jednakowa dla obu rzędów, podobnie też różna jest liczba kabli na poszczególnych półkach. W takim przypadku dokładne wyznaczenie liczby pożarów b_n oraz częstości u'_r możliwe byłoby w sposób przedstawiony na rys. 2 i rys. 3, przy czym poszczególne wartości prawdopodobieństwa p_w wynikałyby tu z rzeczywistej liczby palących się kabli. Jeśli zaś wartości prawdopodobieństwa p_w określić na podstawie przeciętnej liczby k kabli na półkach, wartości b_n i u'_r można wyznaczyć z niewielkim, kilkuprocentowym błędem, korzystając bezpośrednio ze wzorów (2) i (4). Przy niejednakowej liczbie kabli na poszczególnych półkach kablowych częstości u_n i u'_r należałoby wyznaczyć na podstawie wzoru (4) w oparciu o rzeczywiste liczby k kabli na tych półkach, a do wzoru (1) wstawić średnie ważone wartości tych częstości.

3. PRZYKŁAD OBLICZENIA ZAGROŻENIA POŻAROWEGO KABLI

Załóżmy, że w tunelu kablowym znajdują się 2 rzędy półek kablowych, na których kable rozmieszczono tak jak na rys. 4.



Rys. 4. Rozmieszczenie kabli w rozpatrywanym tunelu kablowym

Załóżmy również, że:

a) λ_w = 0,173 dla kabli ułożonych na wspólnej półce kablowej (p_w = 1 dla $w \geq 4$ kabli)[1];

b) λ'_w = 0,058 dla kabli z sąsiednich półek kablowych (p'_w = 1 dla $w \geq 12$ kabli);

c) λ''_w = 0,028 dla kabli z sąsiedniego rzędu półek kablowych (p''_w = 1 dla $w \geq 25$ kabli);

d) analizę zagrożenia pożarowego przeprowadzimy dla kabli a i e z rys. 4.

Dla kabla a otrzymuje się zatem:

$$b_k(1,5) = b_k(5,5) = 5p_1p_2p_3p_4 + 2p_1p_2p_3 + p_1p_2 + p_1 + p_1^2p_3^2 - 2p_1^2p_3p_4 - p_1^2p_3 - p_1^2 - 2p_1p_2p_3^2 = 0,48,$$

$$u_p(5) = 10p_1p_2p_3p_4 + p_1^2p_3^2 - 4p_1^2p_3p_4 - 2p_1p_2p_3^2 = 0,38,$$

$$u'_p(4) = 6p_1p_2p_3 - 2p_1^2p_3 = 0,27,$$

$$b_p(2,5) = 3p'_1p'_2p'_3 + p'_1p'_2 + 2p'_1 - (p'_1)^2p'_3 - (p'_1)^2 = 1,49,$$

$$u'_r(6) = 14p'_1p'_2p'_3p'_4p'_5 + 2(p'_1)^2(p'_3)^2p'_5 - 6(p'_1)^2p'_3p'_4p'_5 - 4p'_1p'_2(p'_3)^2p'_5 = 1,26,$$

$$b_r(1,2) = p''_1 = 0,96.$$

Względny wzrost zagrożenia pożarowego ΔB_p tego kabla (w porównaniu z przypadkiem braku oddziaływania innych kabli) równy jest zatem

$$\Delta B_p = 0,48 + 0,38 \cdot 1,49 + 0,27 \cdot 1,26 \cdot 0,96 = 1,37.$$

Dla kabla b otrzymuje się natomiast:

$$b_k(3,5) = 4p_1p_2 + 2p_1 - 2p_1^2 = 0,62,$$

$$u_p(5) = 0,38,$$

[1] Wartość λ_w wynika ze wzoru (3), gdy p_w = 1 i w = 4. Przyjęta wartość w oznacza najmniejszą liczbę kabli, palących się już z taką "siłą", że zapali się od nich każdy następny kabel, ułożony na tej samej półce kablowej. Podobnie wyznaczono wartości λ'_w i λ''_w.

$$u_p'(4) = 0,27,$$
$$b_o(3,5) = 4p_1'p_2' + 2p_1' - 2(p_1')^2 = 1,49,$$
$$u_r'(6) = 1,26,$$
$$b_r(1,2) = 0,96,$$
$$\Delta B_o = 0,62 + 0,38 \cdot 1,49 + 0,27 \cdot 1,26 \cdot 0,96 = 1,51.$$

Analogiczne obliczenia dla kabla c dają rezultat:

$$b_k(2,4) = b_k(3,4) = 2p_1p_2 + 2p_1 - p_1^2 = 0,50,$$
$$u_p(4) = 0,27,$$
$$u_p'(5) = 0,38,$$
$$b_p(1,6) = 7p_1'p_2'p_3'p_4'p_5' + 2p_1'p_2'p_3'p_4' + 2p_1'p_2'p_3' + p_1'p_2' + p_1' + - 3(p_1')^2p_3'p_4'p_5' - 2p_1'p_2'(p_3')^2p_5' - (p_1')^2p_3'p_4' + - 2p_1'p_2'(p_3')^2 - (p_1')^2p_3' - (p_1')^2 + (p_1')^2(p_3')^2p_5' + + (p_1')^2(p_3')^2 = 1,21,$$
$$u_r'(5) = 10p_1'p_2'p_3'p_4' + (p_1')^2(p_3')^2 - 4(p_1')^2p_3'p_4' - 2p_1'p_2'(p_3')^2 = = 1,76,$$
$$b_r(2,2) = p_1'' = 1,00,$$
$$\Delta B_o = 0,50 + 0,27 \cdot 1,21 + 0,38 \cdot 1,76 \cdot 1,00 = 1,50.$$

Podobnie dla kabla d otrzymuje się

$$\Delta B_p = 0,37 + 0,27 \cdot 1,23 + 0,38 \cdot 1,76 \cdot 1,00 = 1,37,$$

a dla kabla e

$$\Delta B_p = 0,50 + 0,27 \cdot 1,23 + 0,38 \cdot 1,76 \cdot 1,00 = 1,50.$$

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone obliczenia zagrożenia pożarowego kabli pracujących w tunelu kablowym wykazują, że zagrożenie to, przy dokonanych założeniach, jest ok. 2,5-krotnie większe niż w przypadku braku oddziaływań pomiędzy kablami. Zagrożenie pożarowe rośnie wraz ze wzrostem liczby kabli, ułożonych na wspólnej półce kablowej oraz ze wzrostem liczby półek rozmieszczonych we wspólnym rzędzie, przy czym większy wpływ na wzrost zagrożenia ma położenie kabla na określonej półce (numer kabla), niż położenie tej półki w rzędzie półek. Wnioski te, przy innych założeniach co do wartości pa-

rametrów λ_w, λ'_w i λ''_w (a stąd - prawdopodobieństwa p_w, p'_w i p''_w), mogą być jednak inne.

Zaproponowany model matematyczny do analizy zagrożenia pożarowego kabli elektroenergetycznych może być użyteczny praktycznie na etapie projektowania tuneli kablowych i rozmieszczania w nich tych kabli, a zwłaszcza kabli zasilających ważne odbiory. W tym celu niezbędne są jednak odpowiednie badania laboratoryjne celem statycznego oszacowania wartości prawdopodobieństwa p_w, p'_w i p''_w dla różnych typów kabli, różnych odległości pomiędzy rzędami półek, półkami oraz kablami na tych półkach, oraz zastosowanych środków ochronnych.

Innym zagadnieniem jest zagrożenie pożarowe kabli wskutek wystąpienia przyczyn zewnętrznych (np. zapalenie się nagromadzonych palnych zanieczyszczeń i śmieci [4], przedostanie się do tunelu kablowego otwartego ognia itp.), mogących spowodować jednoczesne zapalenie się wielu, a nawet wszystkich kabli w tunelu kablowym. Tak powstające pożary mogą mieć miejsce wielokrotnie częściej niż pożary rozprzestrzeniające się wg przyjętego mechanizmu. Opracowany model matematyczny nie ujmuje takich przypadków, aczkolwiek zdarzają się one w przemysłowych sieciach rozdzielczych o dużej liczbie kabli w tunelach.

LITERATURA

[1] FELCZYŃSKI W.: Wybór rodzaju tras kablowych z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego i walorów techniczno-ekonomicznych. Energetyka nr 9, 1976.

[2] FELCZYŃSKI W.: Podstawowa ochrona przeciwpożarowa tras kablowych. Energetyka nr 11, 1976.

[3] KAZUBSKI M.: Zagrożenie pożarowe wynikające ze stosowania izolacji i powłok z polichlorku winylu. Informator projektanta nr 3, 1975, Elektroprojekt, Warszawa.

[4] MURASZKO O.: Pożary kabli i przewodów w izolacji z plastyfikowanego polichlorku winylu. Informator projektanta nr 3, 1975, Elektroprojekt, Warszawa.

[5] Praca zbiorowa (niepublikowana): Zagadnienie wyboru optymalnych warunków pracy układów elektroenergetycznych Huty Katowice w stanach normalnych i awaryjnych. IEiSU Gliwice, 1978, 1979.

Wpłynęło do redakcji 16.IV.1981 r.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ КАБЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В КАБЕЛЬНЫХ ТУНЕЛЯХ

Р е з ю м е

В статье предложена математическая модель для анализа пожарной опасности электроэнергетических кабелей, работающих в кабельных туннелях. Выполнены примерные расчеты этой опасности и представлены возможности практического использования предложенной модели.

A MATHEMATICAL MODEL FOR ANALYSING FIRE HAZARDS OF CABLES LAID IN A CABLE CHANNEL

S u m m a r y

The paper suggests a mathematical model for analysing fire hazard of electrical cables operating in cable channels. An exemplary calculation of such a hazard was made. The practical possibilities of utilizing the suggested model were presented.