

STANISŁAW SZPILKA
Główny Instytut Górnictwa

ŚRODKI OCHRONY PRZECIWPORAŻENIOWEJ W GÓRNICTWIE

Streszczenie. W artykule przeprowadzono porównawczą analizę środków ochrony stosowanych w różnych układach sieciowych w górnictwie. Wychodząc ze współdziałania sieci i otoczenia ustalono w sposób ogólny mechanizm powstawania wypadku, który przyjęto jako podstawę do klasyfikacji i naświetlenia roli środków ochronnych. Niebezpieczeństwo porażenia potraktowano jako szczególny przypadek zagrożenia, jakie stwarza sieć elektryczna względem otoczenia.

Scharakteryzowano stany awaryjne różnych układów sieciowych ze względu na niebezpieczeństwo porażenia, w przypadku dotknięcia przewodu gołego oraz osłony uziemionej. Omówiono problemy i główne idee rozwiązań technicznych wyłączenia sieci w stanach awaryjnych.

Podkreślono szczególnie duże niebezpieczeństwo przy eksploataowaniu kabli oponowych i naświetlono rolę kabli ekranowanych. W zakończeniu wspomniano o bieżących problemach i tendencjach rozwojowych techniki środków ochronnych.

1. Wstęp

Układy sieciowe oraz napięcia stosowane w różnych krajach w górnictwie wykazują dużą różnorodność. W Polsce stosuje się obecnie, do zasilania napędów, sieci 500 V, 50 Hz z izolowanym punktem zerowym transformatora za wyjątkiem na-

rzędzi ręcznych, które są zasilane z sieci 125 V, 50 Hz, z uziemionym punktem zerowym. Plany perspektywiczne elektryfikacji kopalń rozważają możliwość wprowadzenia napięcia wyższego (865 V), co jest związane ze stale wzrastającą mocą maszyn instalowanych w podziemiach kopalń.

Podobne sieci i napięcia stosowane są we Francji, NRD oraz w większości Krajów Demokracji Ludowej. W ZSRR stosowane są również sieci z izolowanym punktem zerowym oraz napięcia 380 V i 660 V. W Anglii stosuje się napięcia 400, 440, 500, 600, 650 V o częstotliwości 50 Hz oraz do wiertarek 120 V o częstotliwości 150 Hz. Sieci angielskie są przeważnie z uziemionym zerem. Podobnie jest w krajach korzystających z maszyn produkcji angielskiej jak: w Australii, Turcji, Holandii. W Chińskiej Republice Ludowej stosuje się sieci z izolowanym zerem i napięcie 380 V, 60 Hz. W USA stosowany jest szeroko prąd stały 220 i 440 V oraz sieci prądu zmiennego uziemione, 220 i 380 V o częstotliwościach 16 2/3, 25 i 60 Hz.

Powyższa różnorodność sieci pochodzi z odmiennych warunków rozwoju elektryfikacji kopalń oraz z różnicy poglądów na sprawę bezpieczeństwa. Ogólnie jednak można zauważyć dwie tendencje. Jedna to ograniczanie doziemnych prądów zwarciovych, tzn. przechodzenie od sieci z bezpośrednio uziemionym zerem do sieci z zerem uziemionym przez oporność ograniczającą lub do sieci z izolowanym zerem. Druga, to stosowanie coraz to wyższych napięć.

Środki ochronne w różnych układach sieciowych działają na odmiennych zasadach. W artykule przeprowadzona jest analiza porównawcza środków ochronnych w najczęściej spotykanych układach sieciowych, w oparciu o systematykę wynikającą z przyjętego mechanizmu powstania wypadku.

2. Mechanizm powstania wypadku i ogólna charakterystyka środków ochronnych

Ażeby powstał wypadek muszą być spełnione pewne warunki ze strony sieci oraz ze strony otoczenia. Nazwijmy niezbędny warunek do powstania wypadku ze strony sieci - stanem niebezpiecznym sieci (SN) oraz niezbędny warunek ze strony otoczenia - sprzyjającym warunkiem otoczenia (SWO). Gdy oba te warunki są spełnione wypadek nie musi nastąpić natychmiast. Spełnienie równoczesne warunków (SN) i (SWO)

nazwijmy niebezpiecznym działaniem sieci (ND). Niebezpieczne działanie sieci po upływie czasu niezbędnego do powstania wypadku (t_w), który będzie dalej nazywany krótko czasem do wypadku, powoduje wypadek (W). Można to wyrazić równaniem:

$$(SN) \cdot (SWO) = (ND) \xrightarrow{t_w} (W) \quad (1)$$

Równanie (1) może być stosowane przy wszelkiego rodzaju zagrożeniach, jakie stwarza sieć względem otoczenia.

W przypadku porażenia prądem elektrycznym, niebezpieczny stan sieci (SN) jest wtedy, gdy w jakimkolwiek miejscu zewnętrznej osłony sieci pojawi się napięcie, które może spowodować przepływ niebezpiecznego prądu przez ciało człowieka. Przepływ prądu przez ciało człowieka może nastąpić, gdy dotknie on miejsca, w którym występuje stan niebezpieczny (SN) tzn. gdy spełniony będzie warunek (SWO). Wtedy zaczyna się niebezpieczne działanie sieci (SD), które po upływie czasu (t_w) spowoduje wypadek.

W przypadku zagrożenia wybuchem stanem niebezpiecznym (SN) może być np. pojawienie się iskry elektrycznej lub niedopuszczalnie wysokiej temperatury na obudowie, a sprzyjającym warunkiem otoczenia (SWO) będzie obecność mieszaniny wybuchowej w miejscu gdzie występuje (SN).

Z równania (1) charakteryzującego w sposób ogólny mechanizm powstania wypadku, wynikają następujące możliwości działania środków ochronnych:

- a) przez niedopuszczenie do powstania stanu niebezpiecznego sieci (SN),
- b) przez niedopuszczenie do powstania sprzyjającego warunku otoczenia (SWO),
- c) przez ograniczenie czasu trwania niebezpiecznego działania sieci (ND) poniżej czasu do wypadku (t_w).

Nie wszystkie powyższe 3 możliwości mogą być wykorzystane w poszczególnych przypadkach zagrożeń.

W celu wyjaśnienia zasady działania środków ochronnych polegającej na niedopuszczeniu do powstania stanu niebezpiecznego sieci (SN) wprowadzmy następujące określenia:

Stan awaryjny jest to stan różny od stanu normalnego. Stan awaryjny powstaje w wyniku zajścia zdarzenia losowe-

go (np. uszkodzenia izolacji). Zdarzenie losowe, jakie zachodzi w sieci, znajdującej się w stanie normalnym, stanowi początek procesu zakłóceniewego. Po pierwszym zdarzeniu losowym następuje w sieci albo stan niebezpieczny (SN) albo stan awaryjny, który nie jest jeszcze stanem niebezpiecznym, a który nazywamy stanem zagrożeniowym. Stany zagrożeniowe są więc stanami awaryjnymi pośrednimi między stanem normalnym a stanem niebezpiecznym. Przejście ze stanu zagrożeniowego do stanu niebezpiecznego odbywa się w wyniku zajścia następnych zdarzeń losowych. Stanów zagrożeniowych może być kilka. Zjawisko przechodzenia od stanu normalnego sieci poprzez stany zagrożeniowe do stanu niebezpiecznego sieci stanowi proces zakłóceniewy [1]. Czas trwania stanu zagrożeniowego określony jest prawdopodobieństwem zajścia następnego zdarzenia (uszkodzenia sieci).

Niedopuszczenie do powstania stanu niebezpiecznego sieci polega na przerwaniu procesu zakłóceniewego zanim wystąpi stan niebezpieczny sieci. Przerwanie procesu zakłóceniewego może odbyć się przez:

- a) wyłączenie sieci w stanie zagrożeniowym,
- b) sygnalizację stanu zagrożeniowego i usunięcie przyczyny jego powstania.

Sposób b) ma niewątpliwie korzyści ruchowe, gdyż nie powoduje przerwy w dostawie energii elektrycznej. Z drugiej strony czas trwania stanu zagrożeniowego może być w tym przypadku długi, co zwiększa prawdopodobieństwo zajścia następnego uszkodzenia sieci. Sposób ten może być stosowany, jeżeli między sygnalizowanym stanem zagrożeniowym a stanem niebezpiecznym będzie występował jeszcze jeden stan awaryjny pośredni lub jeżeli sieć będzie wyposażona w takie urządzenia zabezpieczające, że ewentualnie powstały stan niebezpieczny nie będzie mógł trwać dłużej od t_w .

Niedopuszczenie do powstania sprzyjającego warunku otoczenia polegałoby, w przypadku porażenia prądem, na ogrodzeniu maszyny pracującej, tak aby załoga nie mogła dotknąć obudowy w czasie pracy urządzenia. W sieciach kopalnianych, ze względów technologicznych, taki sposób ochrony nie może być oczywiście brany pod uwagę. Przykład na zastosowanie tego sposobu ochrony znajdujemy przy zagrożeniu wybuchem, np. wentylacja nie dopuszczająca do nagromadzenia się gazów wybuchowych albo czujniki do detekcji gazów

wybuchowych, powodujące wyłączenie sieci w razie pojawienia się mieszaniny wybuchowej gazów.

Środek ochronny polegający na ograniczeniu czasu trwania niebezpiecznego działania sieci poniżej t_w może być zastosowany w przypadku zagrożenia porażeniem, gdyż charakter działania wykazuje zależność prądowo czasową. Sposób ten nie jest natomiast możliwy w przypadku zagrożenia wybuchem np. od iskry elektrycznej. Wybuch następuje tak szybko (praktycznie momentalnie), że nie jest możliwe zrealizowanie na tej zasadzie zabezpieczenia.

Ze względu na niebezpieczeństwo porażenia możliwe są dwie zasady działania środków ochronnych. Polegają one na wyeliminowaniu bądź warunku (SN) bądź (t_w) w równaniu (1).

Realizacja techniczna ochrony przeciwporażeniowej polega na:

- a) doborze układu sieciowego (wraz z uziemieniami, przewodami zerowymi, ochronnymi itp.),
- b) wyposażeniu sieci w urządzenia zabezpieczające, pozwalające na wykrycie stanów awaryjnych i przerwanie procesu zakłóceniewego.

Powyższe dwa środki techniczne wchodzące w skład ochrony przeciwporażeniowej są ze sobą ściśle związane. Układ sieciowy wpływa na przebieg procesu zakłóceniewego jak również określa możliwości wykrycia stanów awaryjnych przez zabezpieczenia.

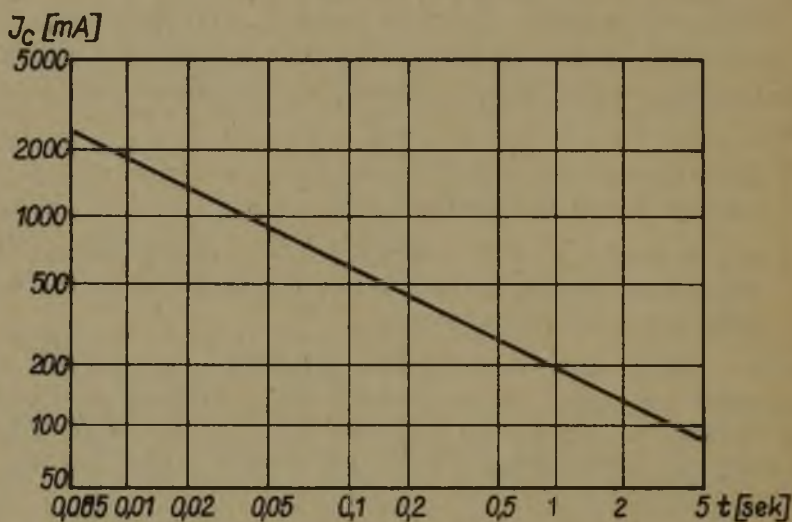
3. Bezpieczne wartości prądów rażeniowych

Fizjologiczne działanie prądu na człowieka jest zagadnieniem specjalnym i nie będzie w tym artykule omawiane. Ograniczymy się tutaj tylko do stwierdzenia, że do zaprojektowania ochrony przeciwporażeniowej muszą być przyjęte następujące dane:

- a) prąd bezpieczny J_b , jaki może długotrwale przepływać przez ciało człowieka,
- b) charakterystyka prądowo-czasowa, podająca dopuszczalny czas przepływu prądu $J_c > J_b$.

Określenie powyższych danych jest bardzo trudne i badania na ten temat są stale prowadzone. Najlepszym tego dowodem jest fakt, że w różnych krajach przyjmowane są różne wartości prądów bezpiecznych:

Polska, Francja	- 25 mA
ZSRR	- 30 mA
Anglia	- 50 mA

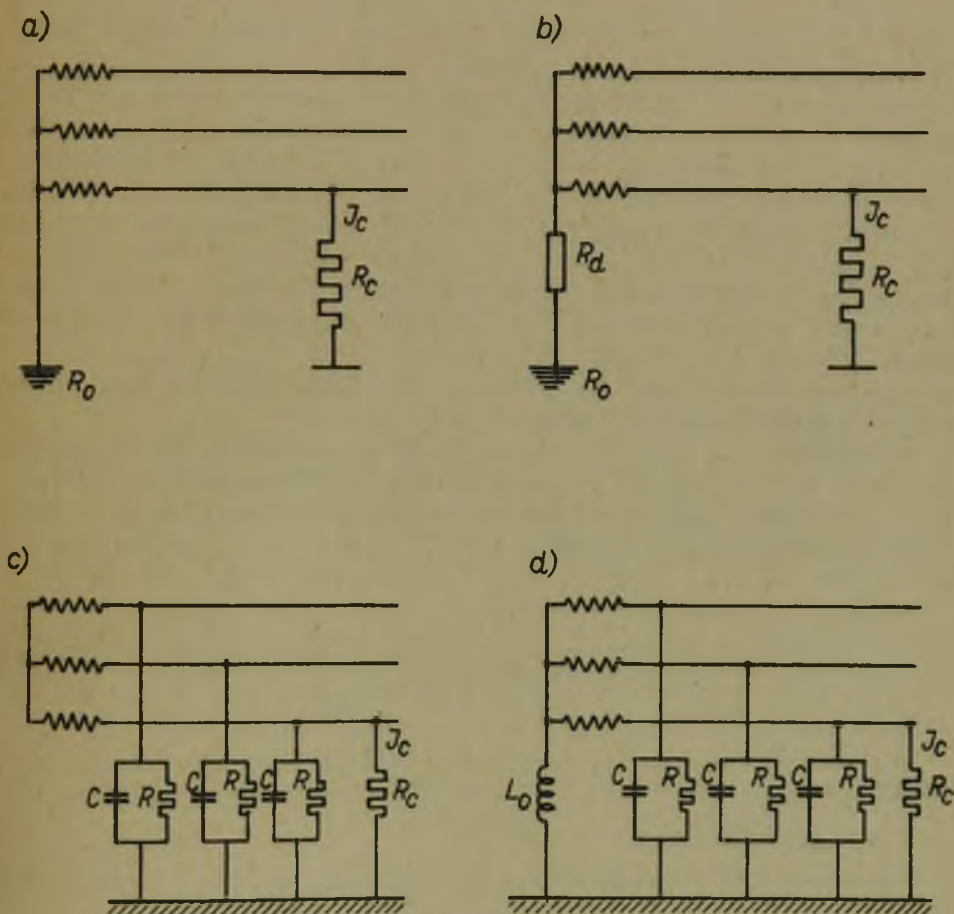


Rys. 1. Charakterystyka prądowo-czasowa, określająca 0,5% prawdopodobieństwo wystąpienia migotania komór sercowych

Prace badawcze nad określeniem bezpiecznego czasu przepływu prądu $J_c > J_b$ przeprowadza się na zwierzętach przy pomocy aparatury sprzężonej z elektrokardiografem, w celu zsynchronizowania czasu podania udaru z fazą pulsacji serca [2]. Rys. 1 przedstawia charakterystykę prądowo-czasową wg źródeł niemieckich [3] podającą zależność prądu od czasu działania przy 0,5% prawdopodobieństwie wystąpienia migotania komór sercowych.

4. Przypadek dotknięcia gołego przewodu w różnych układach sieci 3-fazowych

R_c na rys. 2 przedstawia oporność ciała człowieka. Do analizy w niniejszym artykule przyjęto, że w warunkach kopalnianych szczególnie niebezpiecznych, R_c osiągnąć może wartość 1000Ω .



Rys. 2. Układy sieci 3-fazowych

a - z bezpośrednio uziemionym punktem zerowym, b - z pośrednio uziemionym punktem zerowym, c - z izolowanym punktem zerowym, d - z kompensacją prądu pojemnościowego

W układzie a) z bezpośrednio uziemionym punktem zerowym, prąd płynący przez człowieka wyraża się wzorem:

$$J_c = \frac{U_f}{R_c} \quad (2)$$

Dla sieci 500 V i $R_c = 1000 \Omega$ wartość prądu J_c wynosi 0,288 A. Tak więc dotknięcie przewodu gołego w sieci 500 V powoduje niebezpieczne działanie sieci. Teoretycznie na podstawie rys. 1 wyłączenie sieci w czasie mniejszym od 0,2 sek mogłoby stanowić ochronę na zasadzie ograniczenia czasu niebezpiecznego działania sieci. Jednak zabezpieczenie musiałoby reagować już na prądy powyżej 25 mA. Taka czułość w omawianym układzie jest nieosiągalna, ze względu na trudność w uzyskaniu selektywnego sygnału. Tak więc układ z bezpośrednio uziemionym punktem zerowym nie daje możliwości wykonania ochrony przeciwporażeniowej w przypadku dotknięcia gołego przewodu.

Podobne uwagi dotyczą układu b) z punktem zerowym uziemionym przez oporność ograniczającą.

W układzie c) z izolowanym punktem zerowym, prąd płynący przez człowieka ograniczony jest opornościami sieci. Przy założeniu jednakowych oporności poszczególnych faz, prąd ten wyraża się wzorem:

$$J_c = U_f G_c \left| \frac{3\hat{Y}}{3\hat{Y} + G_c} \right| \quad (3)$$

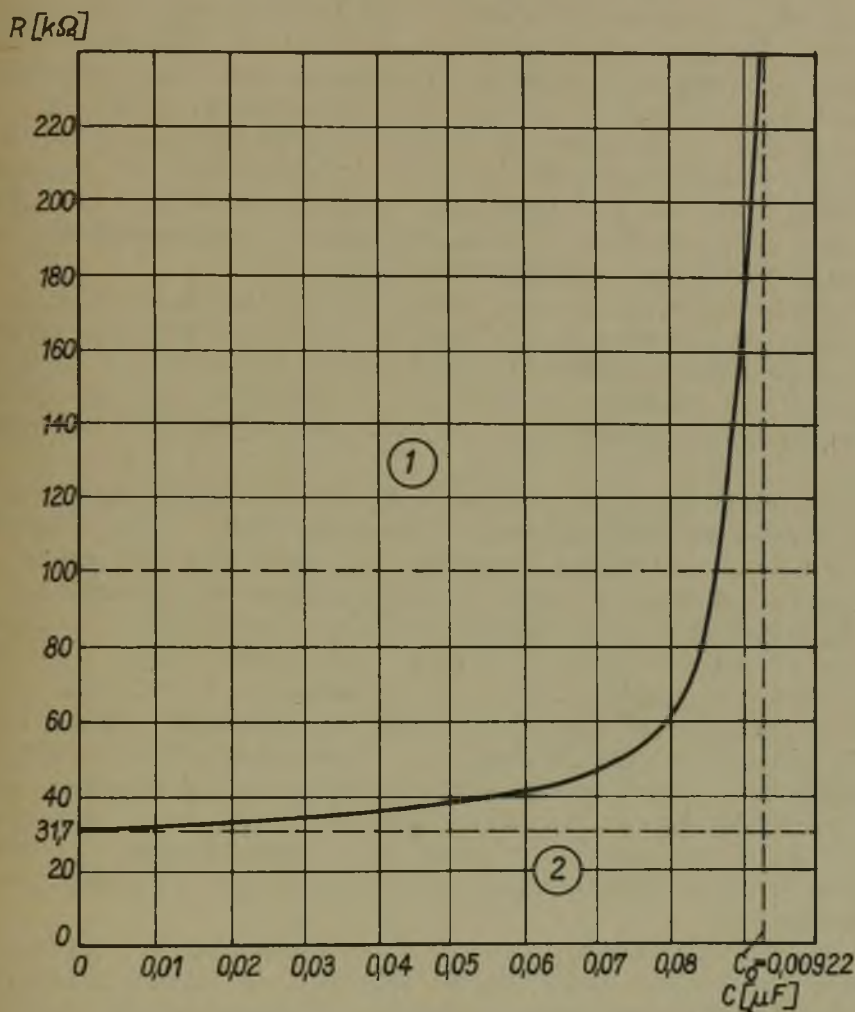
gdzie:

$$\hat{Y} = G + j\omega C$$

Podstawiając w równaniu (3) $J_c = J_b$ można określić zależność $C = f(R)$, podającą graniczne wartości R , poniżej których, przy danym C , popłynie przez człowieka prąd $J_c > J_b$. Zależność ta wyrażona w funkcji $G = 1/R$ wyraża się wzorem:

$$C = \frac{1}{3\omega} \sqrt{\frac{J_b^2 (3G + G_c)^2 - 9U_f^2 G_c^2 G^2}{U_f^2 G_c^2 - J_b^2}} \quad (4)$$

Wg wzoru (4) skonstruowano krzywą przedstawioną na rys. 3 dla sieci 500 V, $J_b = 25 \text{ mA}$ i $R_c = 1000 \Omega$.



Rys. 3. Charakterystyka $R = f(C)$ dla sieci 500V, $J_b = 25 \text{ mA}$, $R_c = 1000 \Omega$

Krzywa na rys. 3 wyznacza dwa obszary. W obszarze ① znajdują wartości parametrów (R, C) przy których $J_c < J_b$. W obszarze ② $J_c > J_b$. Jeżeli sieć posiada parametry le-

żące w obszarze ① to napięcie przewodu gołego względem ziemi (288 V) nie jest niebezpieczne. warunki takie są możliwe tylko dla $C < C_0 = 0,0922 \mu\text{F}$.

Kontrola parametrów sieci i wyłączanie, gdy ich wartości będą jeszcze znajdowały się w obszarze ① byłoby realizacją ochrony na zasadzie niedopuszczenia do powstania stanu niebezpiecznego sieci. Np. urządzenie, które by wyłączało sieć, gdy oporność obniży się do $100 \text{ k}\Omega/\text{fazę}$ stanowiłoby taką ochronę w sieciach o pojemności $C < 0,082 \mu\text{F}/\text{fazę}$. Wtedy należy przyjąć, że stan normalny sieci jest gdy $R > 100 \text{ k}\Omega/\text{fazę}$, natomiast stan zagrożeniowy gdy $R < 100 \text{ k}\Omega/\text{fazę}$ (w obszarze ①).

Powyższy sposób ochrony może być zastosowany tylko do bardzo krótkich sieci. Pojemności sieci górniczych wynoszą $0,4-0,8 \mu\text{F}/\text{km}$, co daje dla pojemności granicznej $C_0 = 0,0922 \mu\text{F}$ długości w granicach 115-230 m. Z tego względu ten sposób ochrony nie znajduje praktycznego zastosowania.

W układzie d) zastosowana jest indukcyjność dla kompensacji prądu pojemnościowego płynącego przez R_c . Zakładając przypadek idealnej kompensacji, prąd płynący przez R_c (w stanie ustalonym), nie będzie zależał od pojemności sieci C , a wartość jego będzie równa przypadkowi z układu c) gdy $C = 0$. Na rys. 3 obszar bezpieczny sieci znajdowałby się nad prostą (linia przerywana) $R = 31,7 \text{ k}\Omega$. Dla sieci kopalnianych przyjmuje się, że oporność izolacji powinna wynosić $10-50 \text{ k}\Omega/\text{km}/\text{fazę}$. Tak więc w tym przypadku realizacja ochrony mogłaby dotyczyć sieci o długości ok. 1 km. Trudność w tym przypadku stanowi fakt, że pojemność sieci ulega zmianie przy włączaniu i wyłączaniu poszczególnych linii. Rozwiązanie wymagałoby więc automatycznej kompensacji.

Przeprowadzona szkicowo analiza porównawcza różnych układów sieciowych prowadzi do wniosku, że sieci z izolowanym punktem zerowym dają najwięcej teoretycznych możliwości rozwiązania omawianego problemu i jakkolwiek przy założeniu najniekorzystniejszych warunków problem nie jest rozwiązany, zapewniają one stosunkowo najwyższy poziom bezpieczeństwa. Dokładniejsza analiza wymagałaby uwzględnienia nierównomierności oporności poszczególnych faz, co jednak wykraczałoby poza ramy tego ogólnego artykułu. Zagadnienia te są szeroko dyskutowane w literaturze ZSRR [4,5,6].

5. Przypadek dotknięcia osłony uziemionej5.1. Sieć z bezpośrednio uziemionym punktem zerowym

Rozróżnimy dwa przypadki:

a) oporność izolacji w miejscu uszkodzenia $R_u = 0$.

Prąd płynący przez człowieka wynosi:

$$J_c = \frac{J_u R_z}{R_c} \quad (5)$$

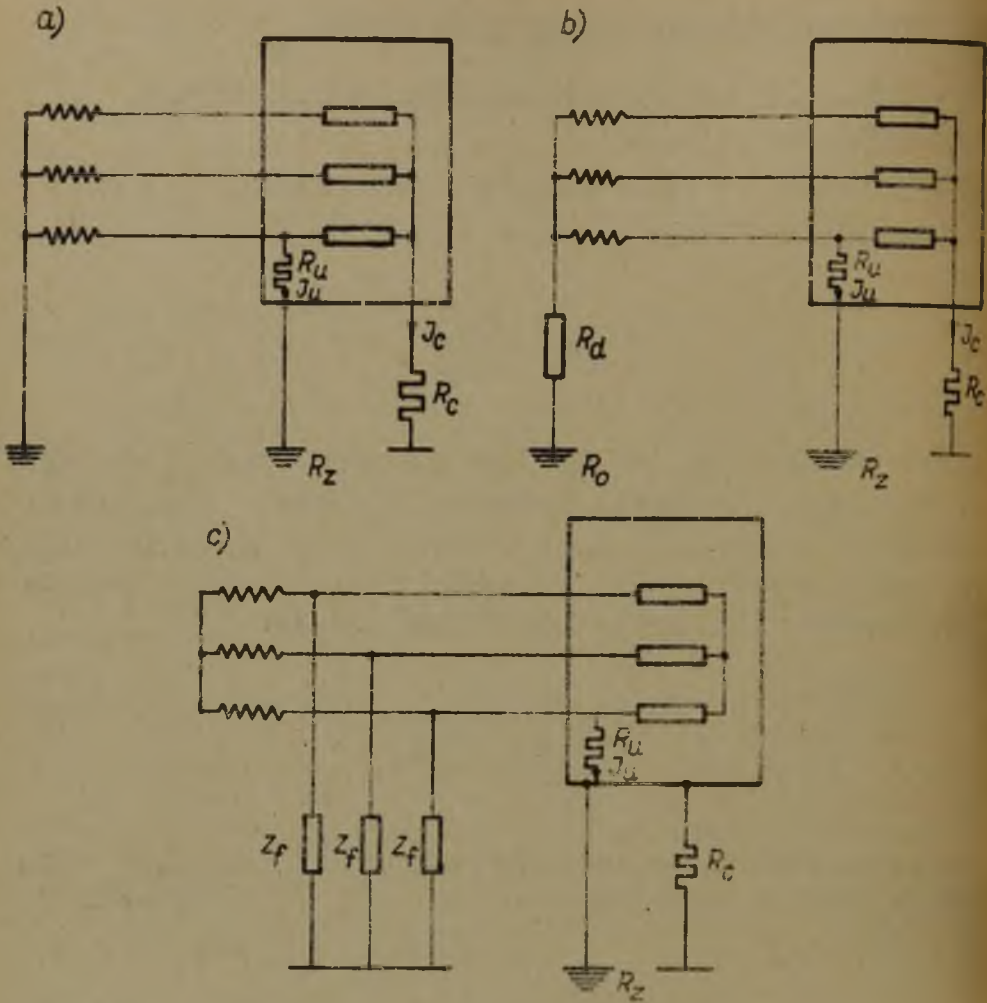
gdzie: założono $R_z \ll R_c$. Prąd płynący przez R_c zależy od $U_u = J_u R_z$ (napięcie uszkodzenia). Jako bezpieczną wartość U_u przyjmuje się 24 V (jeżeli $R_c = 1000\Omega$). Prąd J_u jest w rozpatrywanym przypadku pełnym prądem zwarcia jednofazowego do ziemi. Wartość jego wynosi:

$$J_u = \frac{U_f}{|Z_s + R_z + R_o|} \quad (6)$$

Przyjmując dla oszacowania wielkości, sieć idealną $Z_s = 0$, z bardzo dobrym uziemieniem roboczym $R_o = 0$, otrzymamy:

$$J_u = \frac{U_f}{R_z} \quad \text{oraz} \quad U_u = U_f \quad (7)$$

Z powyższego wynika, że w sieci z uziemionym zerem należy liczyć się z napięciem U_u w przybliżeniu równym U_f . Występujące tutaj warunki rażeniowe przypominają przypadek dotknięcia przewodu gołego. Zasadniczą różnicą jest tutaj fakt, że powstaniu stanu niebezpiecznego sieci towarzyszy przepływ dużego prądu zwarciovego, który w sposób wyraźny odróżnia stan awaryjny sieci od stanu normalnego. Dzięki temu, sieć może być wyłączona przez zabezpieczenia w cza-



Rys. 4. Przepływ prądu przez człowieka przy uszkodzeniu izolacji względem osłony uziemionej

a - sieć z bezpośrednio uziemionym punktem zerowym, b - sieć z pośrednio uziemionym punktem zerowym, c - sieć z izolowanym punktem zerowym

80
 sie $< 0,2$ sek, co przy napięciu 500 V daje ochronę przed porażeniem.

b) oporność izolacji w miejscu uszkodzenia $R_u \neq 0$

Przy powyżej uczynionych założeniach upraszczających wartości J_u oraz U_u będą następujące:

$$J_u = \frac{U_f}{R_u + R_z} \quad (8)$$

$$U_u = \frac{U_f}{\frac{R_u}{R_z} + 1} = \frac{U_f}{k + 1} \quad (9)$$

Wzór (9) określa stosunek k , przy którym U_u będzie większe od bezpiecznego. Dla sieci 500 V, jeżeli $k < 11$, to $U_u > 24$ V. Jeżeli np.:

$R_z = 10 \Omega$, to stan niebezpieczny przy $R_u < 110 \Omega$ i $J_u > 2,4$ A gdy $R_z = 4 \Omega$, to stan nieb. sieci przy $R_u < 44 \Omega$ i $J_u > 6$ A.

Ochrona obejmująca przypadki niepełnych zwarć musi polegać również na wyłączeniu w stanie niebezpiecznym sieci, z tym, że zabezpieczenia muszą być specjalnie czułe. Problemy wyłączenia stanów awaryjnych będą omówione oddzielnie.

5.2. Układ z pośrednio uziemionym zerem

Przypadek rozpatrzmy przy założeniu $R_u = 0$. Wtedy mamy:

$$J_u = \frac{U_f}{R_d + R_z} \quad (10)$$

$$U_u = \frac{U_f}{\frac{R_d}{R_z} + 1} = \frac{U_f}{k' + 1} \quad (11)$$

Z wzoru (11) można określić R_d , przy którym U_u będzie mniejsze od 24 V. Zachodzi to dla $k' = 11$. Dla $R_z = 4\Omega$ otrzymujemy $R_d = 44\Omega$. Wtedy jednak prąd zwarcia wyniesie tylko 6 A. Ogólnie układ można scharakteryzować następująco:

Oporność ograniczająca R_d zmniejsza napięcie uszkodzenia, co ze względu na niebezpieczeństwo porażenia jest korzystne. Równocześnie jednak zostaje zmniejszony prąd zwarcia doziemnego, co utrudnia rozwiązanie układów zabezpieczających. Oporność R_d musi być dobrana do czułości zabezpieczeń.

5.3. Układ z izolowanym punktem zerowym

Prąd zwarcia doziemnego ograniczony jest opornością sieci:

$$J_u = \frac{U_f}{\left| \frac{1}{3} Z_f + R_z \right|} \quad (12)$$

Wielkość prądu doziemnego w sieciach z izolowanym zerem jest bardzo mała. Dla oszacowania przyjmijmy oporność izolacji jednej fazy $12\text{ k}\Omega$ (poniżej tej wartości sieć zostaje wyłączona przez urządzenie do kontroli stanu izolacji) oraz pojemność $2\ \mu\text{F}$. Wtedy $J_u = \text{ok. } 0,55\text{ A}$. Przy takim prądzie doziemienia, napięcie uszkodzenia wyniesie 24 V dopiero przy oporności uziemiania $R_z = 44\Omega$. W sieci z izolowanym zerem mamy więc praktyczną możliwość niedopuszczenia do powstania stanu niebezpiecznego sieci, w przypadku uszkodzenia izolacji względem osłony uziemionej. Ze względu na małe prądy ziemnozwarciowe, układy z izolowanym zerem wymagają specjalnych urządzeń zabezpieczających.

6. Wyłączenie stanów awaryjnych

6.1. Sieć z bezpośrednio uziemionym punktem zerowym

Stanem awaryjnym, jaki powstaje na osłonie uziemionej w wyniku uszkodzenia izolacji jest stan niebezpieczny sieci, który powinien być wyłączony w czasie $< 0,2$ sek. Zachowanie tego warunku napotyka na trudności w sieciach wyposażonych w zabezpieczenia nadmiarowe a zwłaszcza bezpieczniki. Bezpieczniki wyłączają w czasie $0,2$ sek w przybliżeniu przy czterokrotnej wartości prądu zwarcia w stosunku do prądu znamionowego bezpiecznika. Największy prąd znamionowy bezpiecznika, przy którym nastąpi prawidłowe wyłączenie, może być obliczony w zależności od R_z . Np. dla sieci 500 V otrzymujemy następujące dane:

$R_z = 0,5 \Omega$	$J_{zw} < 576 \text{ A}$	$J_{NB} < 144 \text{ A}$
$R_z = 1 \Omega$	$J_{zw} < 288 \text{ A}$	$J_{NB} < 72 \text{ A}$
$R_z = 4 \Omega$	$J_{zw} < 72 \text{ A}$	$J_{NB} < 18 \text{ A}$
$R_z = 10 \Omega$	$J_{zw} < 28,8 \text{ A}$	$J_{NB} < 7,2 \text{ A}$

Z powyższego zestawienia wynika, że prawidłowe wyłączenie zwarć doziemnych wymaga przy większych odbiornikach bardzo małych oporności uziemień, co w praktyce często jest niewykonalne. Uzyskanie lepszych warunków wyłączania może być osiągnięte dwoma sposobami:

- przez zwiększenie prądów zwarcia doziemnego,
- przez zastosowanie czulszych zabezpieczeń.

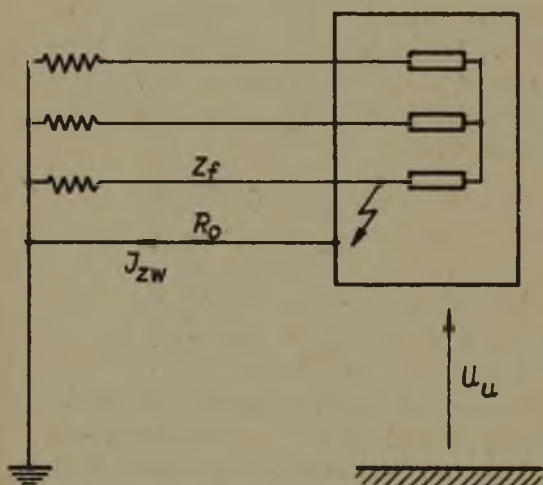
Zwiększenie prądu zwarcia doziemnego otrzymuje się przez połączenie osłony z punktem zerowym transformatora przy pomocy przewodu zerowego, jest to tzw. zerowanie. Schemat sieci, w której zastosowano zerowanie przedstawia rys. 5.

Prąd zwarcia doziemnego wyraża się wzorem:

$$J_{zw} = \frac{U_f}{|\hat{Z}_s + R_o|} \quad (13)$$

Ponieważ $R_o < R_z$ otrzymujemy zwiększenie prądu zwarcio-
wego. Zerowanie zmniejsza również napięcie uszkodzenia, ja-
kie występuje na osłonie:

$$U_u = \frac{U_f}{\frac{R_f}{R_o} + 1} = \frac{U_f}{\frac{s_o}{s_f} + 1} \quad (14)$$



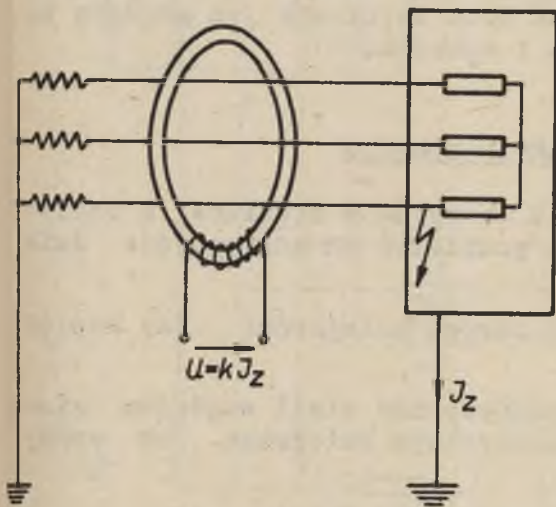
Rys. 5. Schemat sieci z uzziemionym punktem zerowym transformatora, w której zastosowano zerowanie

We wzorze (14) uwzględniono tylko oporność czynną sieci. Ponieważ przewód zerowy prowadzony jest jako 4 żyła kabli, a więc posiada tę samą długość co przewody fazowe, stosunek R_f/R_o może być zastąpiony stosunkiem przekrojów s_o/s_f . Kable górnicze mają zwykle przekrój czwartej żyły równy przekrojowi żył roboczych, przez co otrzymujemy zmniejszenie napięcia uszkodzenia do $1/2 U_f$.

Drugi sposób poprawy warunków wyłączania

wyłączania polega na zastosowaniu specjalnych zabezpieczeń. Zabezpieczenia nadmiarowe działają na wielkość prądu przepływającego i nie rozróżniają prądu roboczego od prądu będącego wynikiem uszkodzenia izolacji. Ta nieselektywność powoduje, że muszą one być odstrojone od prądów roboczych (również rozruchowych) przez co nie mogą być czułe. W sieciach 3-fazowych zwarcia doziemne powodują powstanie niesymetrii w prądach, które nie występują przy pracy normalnej. Przez zastosowanie filtrów składowych symetrycznych można wykonać zabezpieczenie reagujące tylko

na prąd płynący w wyniku uszkodzenia. Przy zwarciach doziemnych w grę wchodzi filtry składowej zerowej kolejności



Rys. 6. Zabezpieczenie typu "Core balance" w sieci z uziemionym zerem

faz prądów, którymi najczęściej są przekładniki Ferrantiego. Zabezpieczenie tego typu jest bardzo rozpowszechnione w górniczych sieciach uziemionych, szczególnie w Anglii, gdzie znane jest pod nazwą zabezpieczenia typu "Core balance". Idee tego zabezpieczenia ilustruje rys. 6.

Napięcie sygnału na wyjściu z przekładnika Ferrantiego jest proporcjonalne do J_z . Zabezpieczenia te wykonywane są na czułość od ok. 5% prądu roboczego. Np. w linii, do której

przyłączony jest silnik o prądzie znamionowym 40 A, prąd rozruchowy zabezpieczenia wyniesie 2 A, podczas gdy w przypadku bezpieczników, zakładając prąd znamionowy bezpieczników 60 A, dopiero prąd o wartości 240 A zapewni prawidłowe wyłączenie. Porównanie powyższe najlepiej dowodzi, że zabezpieczenie typu "Core balance" jest radykalnym rozwiązaniem problemu wyłączania zwarcí doziemnych w sieciach uziemionych. Cenną zaletą tego zabezpieczenia jest również fakt, że wyłącza ono selektywnie poszczególne linie sieci. Zalety te są też głównym argumentem zwolenników sieci uziemionych.

6.2. Sieci z pośrednio uziemionym punktem zerowym

Zabezpieczenie typu "Core balance", dzięki swej czułości, umożliwiło ograniczenie prądu zwarcia doziemnego. Wielkość oporności ograniczającej musi być dobrana do czułości zabezpieczenia. Np. w sieciach w Holandii stosuje się opor-

ność ograniczającą 9Ω (indukcyjną), co przy napięciu 500V ogranicza prąd zwarciovowy do wartości 30 A. Zabezpieczenie działa już od prądu 3 A z czasem 0,1 sek. Ograniczenie prądu zwarciovowego ma również duże znaczenie ze względu na bezpieczeństwo wobec pożaru i wybuchu.

6.3. Sieci z izolowanym punktem zerowym

Urządzenia wyłączające stany awaryjne w sieciach z izolowanym punktem zerowym można podzielić na następujące dwie grupy:

- a) reagujące na składową zerową kolejności faz napięć fazowych,
- b) reagujące na wypadkową oporność sieci względem ziemi, mierzoną prądem kontrolnym nałożonym na prądy robocze.

Zasadę działania tych urządzeń przedstawia rys. 7.

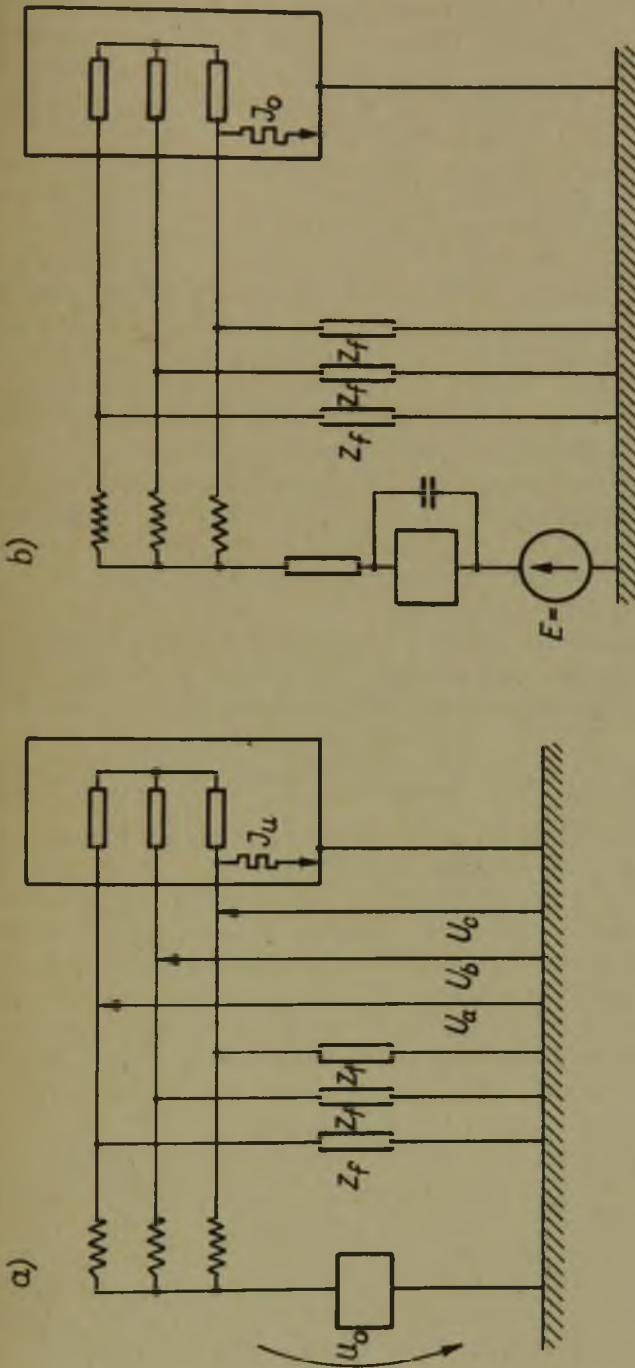
Układ przedstawiony na rys. 7a reaguje na wielkość napięcia U_0 , które przy założeniu równych oporności faz wynosi:

$$U_0 = \frac{U_f}{\left| 3 \frac{R_u}{Z_f} + 1 \right|} \quad (15)$$

Prąd upływu wynosi:

$$J_u = \frac{U_f}{\left| \frac{1}{3} Z_f + R_u \right|} \quad (16)$$

Z wzorów (15) i (16) wynika, że przy danym R_u , im mniejsze Z_f tym większy prąd J_u i tym mniejsze U_0 (a tym samym mniejsza czułość układu). Z drugiej strony zagrożenie jest tym większe im większy prąd J_u , zatem pożądanym by było aby sygnał był tym większy im mniejsze Z_f . Po-



Rys. 7. Urządzenia do wyłączenia stanów awaryjnych w sieci z izolowanym punktem zerowym
 a - działające na składową zerową kolejności napięć fazowych, b - działające na wypadkową oporność sieci względem ziemi

za tym układ nie reaguje na symetryczne obniżenie się oporności faz względem ziemi, przez co nie może być zastosowany do wyłączenia w stanie zagrożenia podanym w pkt. 4.

Układ przedstawiony na rys. 7b mierzy oporność wypadkową sieci względem ziemi. Jako prąd kontrolny może być zastosowany dowolny prąd różniący się od prądu roboczego. Stosuje się prąd stały lub prąd o większej częstotliwości (we Francji 5 kHz). Największe rozpowszechnienie znalazł prąd stały, który jest też stosowany w krajowych urządzeniach do kontroli stanu izolacji. Przy zastosowaniu prądu stałego urządzenie mierzy wypadkową oporność czynną sieci. Prąd upływu zależy również od pojemności sieci. Nie odgrywa to w tym przypadku większej roli, gdyż urządzenia te są wyposażone w dławiki do kompensacji prądu pojemnościowego. Dławiki są nastawiane ręcznie na odpowiednie zaczepty.

Przepisy PNE-05050 obowiązują do stosowania w kopalniach urządzeń do kontroli stanu izolacji sieci, wyłączających sieć w przypadku, gdy wypadkowa oporność sieci zmniejszy się poniżej $4\text{ k}\Omega$ w kopalniach niegazowych i poniżej $7\text{ k}\Omega$ w kopalniach gazowych.

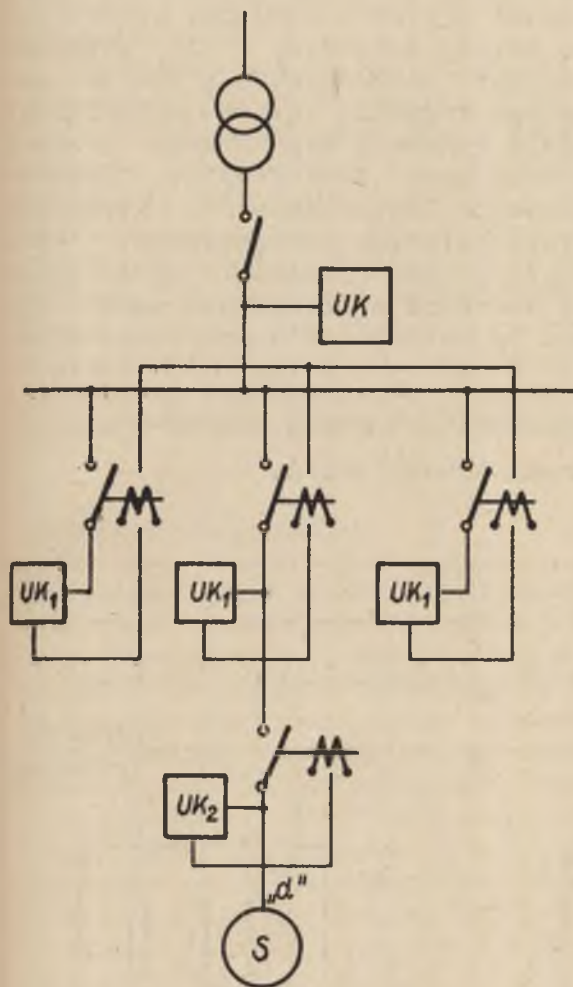
Urządzenia do kontroli stanu izolacji przy pomocy prądu stałego, rozpowszechnione w naszych kopalniach jako typ UKSI, zapewniają bardzo duże bezpieczeństwo wzgl. porażenia a także pożaru.

Porównując układy z rys. 7a i 7b nasuwają się jeszcze następujące uwagi:

Symetryczne wartości oporności poszczególnych faz można przypisać rozłożonym parametrom sieci, którym towarzyszy prąd upływu rozłożony, nie stanowiący istotnego zagrożenia. Niebezpieczeństwo stwarzają upływy skupione, które zwykle powodują asymetrie oporności poszczególnych faz. Na asymetrię działa układ 7a. Układ 7b nie potrafi odróżnić upływu skupionego od rozłożonego. W związku z tym opracowywane są również układy mieszane, w których sygnał składa się z 2 składowych, jednej proporcjonalnej do U_0 , drugiej zależnej od zmierzonej oporności wypadkowej.

Dalszym problemem jest to, że urządzenia typu UKSI nie wyłączają selektywnie, tzn. w przypadku uszkodzenia izolacji w jakimkolwiek miejscu zostaje wyłączona cała sieć. Powoduje to niepożądane przerwy ruchowe. Wyszukanie uszkodzonego odcinka jest kłopotliwe. Aby zmniejszyć czas przerwy do minimum stosuje się dodatkowy pomiar izolacji w stanie wyłączonym, którego celem jest zablokowanie wyłącznika

uszkodzonego odcinka sieci. Sieć wyposażoną w takie urządzenia przedstawia rys. 8. Urządzenia UK zainstalowane w



Rys. 8. Kontrola izolacji sieci z blokowaniem odcinków uszkodzonych

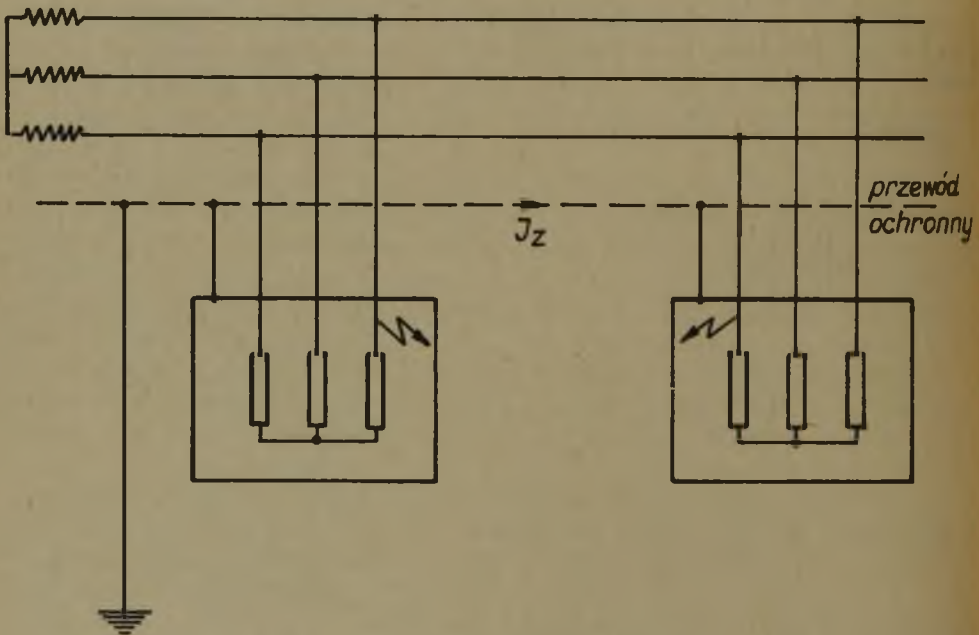
wyłączanie zwarć dwufazowych. Pierwsze urządzenia kontrolujące izolację sieci ograniczały się do sygnalizacji. Wtedy zachodziła obawa uszkodzenia izolacji w innej fazie w

zautomatyzowanej stacji transformatorowej kontroluje całą sieć będącą pod napięciem i w razie uszkodzenia izolacji powoduje wyłączenie 3 styczników na odplywach. Po wyłączeniu styczników zostają włączone na linii odplywowe urządzenia UK1, które w przypadku linii uszkodzonej powodują zablokowanie stycznika. Po upływie ok. 2 sek następuje ponowne załączenie styczników, za wyjątkiem zablokowanego. Podobnie urządzenie UK2 kontroluje odcinki linii "d" w stanie beznapięciowym i w przypadku uszkodzenia odcinka uniemożliwia załączenie stycznika. W ten sposób uszkodzony odcinek zostaje szybko zidentyfikowany a czas przerwy ograniczony do kilku sekund.

Do problemu wyłączenia stanów awaryjnych w sieciach z izolowanym punktem zerowym należy również

czasie trwania sygnału, co prowadziło do niebezpiecznych podwójnych zwarcí doziemnych. Dzisiejsze urządzenia działające na wyłączenie eliminują zasadniczo takie przypadki. Pozostają zwarcia międzyfazowe, którym nie towarzyszą doziemienia, jak zwarcia między żyłami w kablach, zwarcia w wyłącznikach itp. Ponadto należy zauważyć, że podwójne zwarcia z ziemią są szczególnie niebezpieczne, tak iż zabezpieczenia wtórne (drugiego stopnia) są jak najbardziej pożądane. Przepisy PNE-05050 wymagają zapewnienia w sieci warunków szybkiego wyłączenia zwarcí dwufazowych. Uzyskanie takich warunków (zachowanie odpowiedniej krotności prądu zwarciovego w stosunku do prądu znamionowego bezpieczników) napotyka na analogiczne trudności jak wyłączenie zwarcí jednofazowych w sieciach z uziemionym zerem. Dla rozwiązania problemu można tu zastosować analogiczne środki:

- a) zapewnienie większej wartości prądu zwarciovego,
- b) zastosowanie czulszych zabezpieczeń.



Rys. 9. Zastosowanie przewodu ochronnego w sieci z izolowanym zerem

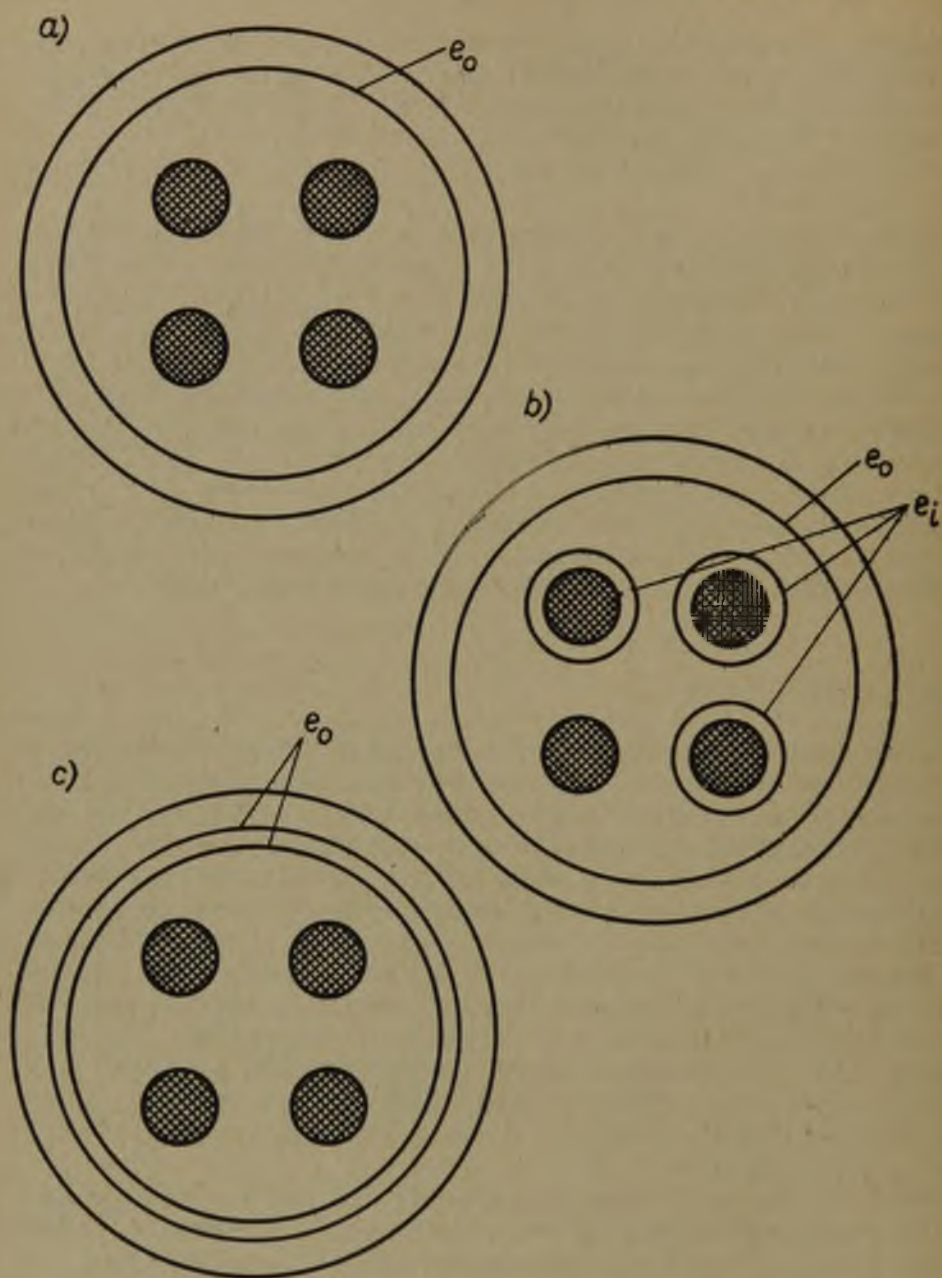
Sposób a) wykonuje się przy pomocy przewodów ochronnych, tj. połączenia wszystkich osłon przy pomocy 4 żyły kabli (rys. 9). Przewód ochronny spełnia analogiczną rolę odnośnie do zwarć dwufazowych w sieciach z izolowanym zerem, co przewód zerowy odnośnie do zwarć jednofazowych w sieciach z uziemionym zerem.

Wykonanie czulszego zabezpieczenia, odstrojonego od prądów roboczych jest możliwe przez wykorzystanie składowej przeciwnej kolejności faz prądów zawartej w prądzie zwarciowym. Zabezpieczenia z filtrem składowej przeciwnej kolejności faz prądów, spełniają więc w sieciach z izolowanym punktem zerowym analogiczną rolę do zabezpieczenia typu "Core balance" w sieciach z uziemionym zerem, z tym że odnoszą się do zwarć dwufazowych. Mogą one być nastawiane na czułość od 15%. Dzięki tej czułości, stanowią one równocześnie doskonałe zabezpieczenie silników od pracy jednofazowej. Zabezpieczenia takie są stosowane we Francji i ZSRR. W Polsce również są opracowywane i wdrażane.

7. Kable ekranowane

Omówione środki ochrony zapewniają pełne bezpieczeństwo w przypadku dotknięcia uziemionej osłony. Nie wszystkie jednak elementy sieci kopalnianej mogą być umieszczone w osłonach metalowych uziemionych. Do takich elementów należą kable oponowe powszechnie stosowane w górnictwie do zasilania maszyn ruchomych. Przy eksploatacji tych kabli zachodzi poważne niebezpieczeństwo porażenia typu "dotknięcie gołego przewodu". Może ono wystąpić w przypadku przebicia opony kabla pękniętym drutem żyły lub wskutek wbicia do opony ostrego przedmiotu. Aby takich wypadków uniknąć stosuje się w kopalniach kable ekranowane. Są to kable w izolacji gumowej, w których żyły otoczone są warstwą gumy przewodzącej (lub siatką metalową). Zasadnicze typy takich kabli podaje rys. 9.

Kabel a) jest wyposażony w pojedynczy ekran ogólny, kabel b) w ekrany indywidualne i ekran ogólny, kabel c) w dwa ekrany ogólne. W rozwiązaniu a) ekran jest uziemiony. W przypadku połączenia żyły z ekranem następuje doziemienie i wyłączenie przez urządzenie do kontroli stanu izolacji. W rozwiązaniu b) ekrany są również uziemione. Ekrany indywidualne zabezpieczają przed zwarćmi dwufazowymi. W ka-



Rys. 10. Typy kabli ekranowanych
 e_o - ekran ogólny, e_i - ekran indywidualny

blu c) konstrukcja umożliwia podanie impulsu na wyłączenie w przypadku zewnętrznych uszkodzeń kabli zanim nastąpi zwarcie między żyłami. W tym przypadku ekrany są połączone z odpowiednim urządzeniem zabezpieczającym.

8. Podsumowanie

Efekty postępu technicznego w dziedzinie środków ochrony najlepiej ilustruje fakt, że mimo kilkakrotnego wzrostu, w okresie powojennym, ilości urządzeń elektrycznych i długości kabli stosowanych w podziemiach kopalń ilość wypadków maleje. Fakt ten jest wynikiem prac naukowo-badawczych wielu ośrodków na całym świecie. Warunki uzyskania pełnego bezpieczeństwa przy eksploatacji urządzeń elektrycznych są coraz dokładniej analizowane a wymagania odnośnie środków ochrony coraz ostrzejsze, co jest wyrazem stale się zwiększającej troski o bezpieczeństwo człowieka pracy. Sprostanie coraz to większym wymaganiom umożliwia głównie zastosowanie elektroniki, która jest szeroko wykorzystywana w urządzeniach górniczych i której rola będzie się stale powiększać.

W referacie omówiono tylko główne zagadnienia ochrony przeciwporażeniowej. Przedstawiono uzyskanie bezpiecznej eksploatacji sieci przy zastosowaniu odpowiednich środków ochrony. W skład środków ochrony wchodzi odpowiednio dobrany układ sieciowy i urządzenia zabezpieczające. Jak długo środki ochrony sprawnie funkcjonują możemy przyjąć pełne bezpieczeństwo. Jednak mogą one ulec uszkodzeniu przez co może powstać niebezpieczeństwo. Dlatego wszystkie urządzenia wchodzące w skład środków ochrony powinny mieć ciągłą kontrolę. Np. ciągłość przewodu ochronnego w kablu zasilającym maszynę ruchomą, jest kontrolowana przez włączenie żyły ochronnej do obwodu sterowniczego. W ten sposób w przypadku przerwy lub zwiększenia oporności, załączenie maszyny jest uniemożliwione, a maszyna pracująca zostaje wyłączona. Urządzenia zabezpieczające powinny być wykonane jako "samokontrolujące się" tzn. powinny powodować wyłączenie w przypadku uszkodzenia aparatu.

Do innych zagadnień należy kompromis między wymaganiami ruchowymi i bezpieczeństwem. Chodzi tu o to, że im czulsze zabezpieczenia tym częstsze wyłączenia sieci (czasem zbędne) a tym samym więcej przerw w dostawie energii. Należy tu zaliczyć również zagadnienie selektywności wyłączenia.

Pewne nowe problemy wynikną w związku z wprowadzeniem wyższych napięć w podziemiach kopalń.

Rękopis złożono w Redakcji w październiku 1965 r.

LITERATURA

- [1] Szpilka St.: Problemy zabezpieczeń podziemnych sieci elektrycznych ze względu na możliwość zapalenia metanu. SITG 1963.
- [2] Streich R.: Zur Frage der Sicherheit im elektrischen Betrieb unter Tage. Glückauf, April 1962.
- [3] Kizimow H.A. i inni: Zawisimost welicziny bezopesnowo elektriczeskowo toka ot wremenij jego deistwija na organizm. Trudy Mak NII, Tom XIV 1962.
- [4] Lejbow: Uczetki w szachtnych elektriczeskich sjetjach Ugljetechnizdat 1952.
- [5] Sziszkin: Bystrodejstwujuszczaja zaszczita szachtnych sjetej ot zamykanja na zemlju. Gosgortechizdat 1960.
- [6] Karpow i inni: Awtomaticzeskoje szachtnie ustrojstwa Gosgotechizdat 1960.
- [7] Kurek R., Szyja S.: Prace z zakresu przystosowania urządzeń elektrycznych dla zmniejszenia zagrożeń rażeńiowych i pożarowych. SITG 1963.
- [8] Peretiatkowicz A.: Bezpieczeństwo ruchu i automatyzacja w podziemiach kopalń. WGH 1962.
- [9] Lejbow: Podzemnoje elektrooborudowanie za rubieżom Ugljetechnizdat 1959.
- [10] Bihl M.C.: Assai de directives d'emploi rationnel des nouvelles protections dans les réseaux d'electrification du fond. Merlin & Gerin.

СРЕДСТВА ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ЗАЩИТЫ
В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Резюме

В статье был проведен сравнительный анализ средств защиты, применяемых в разных сетевых системах в горной промышленности. Исходя из содействия сети и окружающей среды выяснено в общем образование несчастного случая, которое принято как основание для классификаций и указания на роль предохранительных средств. Опасность поражения током принята как особый случай опасности, какую образует электросеть по отношению к окружающей среде. Приведены характеристики аварийных состояний разных сетевых систем по отношению к опасности поражения током в случае прикосновения к голому проводу, а также заземленной защите. Рассмотрены проблемы и основные идеи технических решений отключения сети в аварийных состояниях. Особо подчеркнута большая опасность при эксплуатации шланговых кабелей и указана роль экранированных кабелей. Наконец, затронуты актуальные проблемы и тенденции развития техники предохранительных средств.

ELECTRIC SHOCK PREVENTION MEASURES IN THE MINING

Summary

Description of the comparative analysis of the protective means used in the several net - work systems in the mining. Starting from the net-work and environment co - operation it was established generally the mechanism of the accident formation, which was taken as a base for classification and throwing light upon the role of the protective means. The danger of the shock was handled as the particular threat case. Characteristics of failure states of the several net - work systems on account of the shock danger, in the case of touching the naked conductor and earth protection.

Discussion about the problems and the general ideas of technical solutions of net - work switching off in the failure states. It was pointed out the special great danger at the exploitation of the special rubber cables and it was described the role of the screened cables. Finally it were mentioned the actual problems and the development tendencies of the protective means.