

GÓRNICTWO z. 51



FLORIAN KRASUCKI

P. 3351/72

**PROBLEMY NIEZAWODNOŚCI ORAZ BEZPIECZEŃSTWA
ELEKTRYFIKACJI I AUTOMATYZACJI
PODZIEMI KOPALŃ WĘGLA**

P O L I T E C H N I K A Ś L Ą S K A
ZESZYT NAUKOWY Nr 328 – GLIWICE 1972

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 328



FLORIAN KRASUCKI

**PROBLEMY NIEZAWODNOŚCI ORAZ BEZPIECZEŃSTWA
ELEKTRYFIKACJI I AUTOMATYZACJI
PODZIEMI KOPALŃ WĘGLA**

PRACA HABILITACYJNA Nr 112

GLIWICE 1972

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Iwo Pollo

REDAKTOR DZIAŁU

Jerzy Nawrocki

SEKRETARZ REDAKCJI

Witold Gużkowski

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 50+170 Ark. wyd. 3,5 Ark. druk. 3,75 Papier offsetowy kl. III, 70x100, 80 g
Oddano do druku 2. 2. 1972 Poopis. do druku 10. 4. 1972 Druk ukoń. w kwietniu 1972
Zam. 171 2. 2. 1971 R-23 Cena zł 5,-

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

	Str.
Wstęp	5
1. Techniczne warunki środowiskowe	6
1.1. Czynniki środowiskowe	6
1.2. Narażenia i zagrożenia	8
1.3. Kordynacja wymagań	10
2. Prawdopodobieństwo uszkodzeń i zagrożeń	11
2.1. Podstawy teorii uszkodzeń	11
2.2. Skutki uszkodzeń	14
3. Kryteria bezpiecznej elektryfikacji i automatyzacji podziemi kopalń	16
3.1. Istota problemu	16
3.2. Rażenia elektryczne	18
3.3. Zapłony elektryczne	22
4. Doziemienie w sieci kopalnianej	26
4.1. Napięcia, prąd i moc zwarcia doziemnego	26
4.2. Stan izolacji sieci	28
4.3. Uziemienia ochronne	31
4.4. Wpływ stanu nieustalonego	33
5. Własności kabli i przewodów górniczych	36
5.1. Wpływ temperatury	36
5.2. Wpływ wilgoci	41
5.3. Wpływ rodzaju budowy	42
5.4. Wpływ rozkładu pola w zakończeniach	47
5.5. Wpływ geometrycznego układu żył	52
6. Zakończenie	55
Literatura	56
Streszczenie	58

Wstęp

Bogate zasoby węgla w Polsce oraz względny brak innych paliw predysponuje węgiel na długie jeszcze lata do roli podstawowego źródła energii w kraju. Wynikiem jest planowany dalszy rozwój polskiego przemysłu węglowego i jego produkcji.

Dla uzyskania opłacalnej produkcji górniczej węgla konieczne jest aby [36]:

- stosować rozwiązania techniczne i technologiczne odpowiednie dla wrażliwych trudności, wynikających z pogarszających się warunków naturalnych eksploatowanych złóż,
- stosować je tak, aby nie zmniejszając ich skuteczności uzyskiwać mimo to możliwość ograniczenia wzrostu kosztów produkcji.

Spełnienie tych wymagań na obecnym etapie rozwoju technicznego związane jest ściśle z elektryfikacją i automatyzacją kopalni.

Ze stosowaniem energii elektrycznej, szczególnie w kopalniach gazowych związane jest jednak zwiększenie zagrożenia dla samej kopalni, jej załogi oraz ruchu górniczego. Pojawia się przede wszystkim niebezpieczeństwo porażenia elektrycznych, następuje wzrost prądów błądzących oraz zwiększa się w dużym stopniu prawdopodobieństwo pożarów kopalnianych i wybuchów. W ogólnym przypadku zagrożenie powodowane elektryfikacją zależy od wielu czynników obiektywnych, takich jak: rodzaj pomieszczeń, warunki geologiczne oraz czynników subiektywnych, : systemy eksploatacji górniczej, systemy mechanizacji i rodzaj maszyn górniczych, jak również czynnik bezpośrednio ludzki [20].

Możliwość powstania poszczególnych rodzajów zagrożeń zależy każdorazowo od zaistnienia jednocześnie przyczyny i sprzyjających warunków otoczenia, zależnych głównie od rodzaju pomieszczenia i warunków klimatycznych. Dlatego też w kopalniach gazowych muszą być spełnione przede wszystkim jako podstawowe wymagania: w zakresie zapewnienia należytego przewietrzania elektryfikowanych pomieszczeń oraz stałej kontroli stopnia ich zagazowania. W przypadku stosowania kontroli samoczynnej (metanomierze) wynikiem stwierdzenia zagrożenia gazowego powinno być automatyczne wyłączenie napięcia zasilania urządzeń.

Drugim podstawowym wymaganiem powinno być zapewnienie wysokiej jakości dostarczanych środków elektryfikacji i automatyzacji, dostosowanych do specyficznych warunków środowiskowych podziemi kopalni. Jednocześnie konieczne jest zapewnienie właściwej obsługi i konserwacji eksploatowanych urządzeń.

Zagadnienia te wymagają kompleksowego omówienia, jako podstawowe dla dalszego rozwoju elektryfikacji kopalń, niezależnie od zakresu wprowadzania energii elektrycznej oraz kierunków i nowych tendencji w budowie urządzeń i zabezpieczeń.

Aktualność i potrzeba podjętej pracy, wynika również ze stałej tendencji rozbudowy dołkowej sieci elektroenergetycznej, dostosowywania jej do wzrostu mocy instalowanej oraz konieczności zagwarantowania dużej pewności ruchu przy koncentracji wydobycia i automatyzacji procesów technologicznych.

W oparciu o literaturę źródłową, a przede wszystkim o wcześniejsze opublikowane i nieopublikowane własne prace analityczne, dokonano usystematyzowania pojęć oraz ustalono i przeanalizowano główne czynniki określające techniczne warunki środowiskowe podziemi kopalń, z punktu widzenia ich wpływu na bezpieczeństwo eksploatacji i niezawodność pracy urządzeń.

Analizowano przyczyny i skutki uszkodzeń elementów i ich wpływ na działaność układu, oraz ustalono podstawowe kryteria bezpiecznej elektryfikacji i automatyzacji podziemi kopalń - uzasadniając wagę i konieczność kompleksowego ich traktowania. Wytoczono kierunki prac oraz podano propozycje zmierzające do zwiększenia stopnia niezawodności i bezpieczeństwa, na przykładzie budowy i stosowania kabli i przewodów oponowych górniczych oraz zabezpieczeń i środków ochron dodatkowych.

Wywody teoretyczne i analityczne dokumentowano wynikami przede wszystkim wieloletnich własnych badań i doświadczeń publikowanymi i niepublikowanymi, uzyskanymi głównie w Zakładzie Badań Elektrycznych ZKMPW. Wyniki i wnioski konfrontowano z przyczynkowymi danymi z literatury oraz informacjami uzyskanymi podczas osobistych konsultacji autora w specjalistycznych instytutach naukowo-badawczych w: ZSRR, Francji, WRL i CSRS.

Ze względów technicznych w opracowaniu niniejszym pominięto większość analiz i wyników badań oraz wniosków i zaleceń zawartych w pracy obejmującej: 210 stron tekstu, 28 tabel i 73 rysunków. Praca w całości jest dostępna w Bibliotece Instytutu Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

1. Techniczne warunki środowiskowe podziemi kopalń

1.1. Czynniki środowiskowe

Czynniki środowiskowe mogą wywierać na urządzenia pewne określone oddziaływania, dodatnie lub ujemne, zależnie od stopnia wrażliwości materiałów, elementów czy podzespołów tworzących te urządzenia. Ujemnie działające czynniki nazywamy nałężeniami środowiskowymi. Natomiast same urządzenia mogą z kolei wywierać określone oddziaływania na środowisko, przez swoją obecność lub funkcjonowanie. Jeżeli środowisko jest wrażliwe na te oddziaływania, to mogą one stanowić określone zagrożenia dla środowiska.

Środowisko górnicze w znaczeniu technicznym jest środowiskiem specyficznym, o dużym nasileniu różnorodnych narażeń i zagrożeń. Dlatego też wymaga ono specjalnego potraktowania przez konstruktorów, wytwórców i użytkowników środków elektryfikacji i automatyzacji podziemi kopalń. W szczególności dotyczy to środowiskowych warunków pracy kabli i przewodów górniczych oraz, integralnie z nimi związanych, osprzętu sieciowego i zabezpieczeń.

Dla analizy i oceny wpływu warunków środowiskowych na bezpieczeństwo i niezawodność elektryfikacji i automatyzacji podziemi kopalń konieczna jest szczegółowa charakterystyka zagrożeń i narażeń środowiska górniczego oparta na ustalonych pojęciach podstawowych.

Specyfika warunków środowiskowych w podziemiach kopalń wynika tak z dużej intensywności i kumulowania się narażeń i zagrożeń jak i z tego, że w głównej mierze jest to środowisko wytworzone przez czynniki techniczno-organizacyjne, czyli będące pośrednio efektem działalności ludzkiej. Dlatego również z tych względów ściśle rozgraniczenie poszczególnych rodzajów narażeń jest bardzo utrudnione. Głównie dotyczy to rozgraniczenia narażeń antropogennych, będących wynikiem obecności i bezpośredniej działalności człowieka, od pozostałych. Należy przyjąć, że człowiek jest głównym czynnikiem środowiskowym kształtującym środowisko oraz środki ochrony środowiskowej, tak aby zapewniona była odpowiednia odporność urządzeń i bezpieczeństwo środowiska. Jest to mikroklimat techniczny, a w wielu przypadkach mamy do czynienia również z technokryptoklimatem, tzn. z mikroklimatem wewnątrz zamkniętych urządzeń lub pomieszczeń, wytworzonymi środkami technicznymi.

Mając na uwadze wymienione trudności niekiedy środowisko górnicze możemy określać w sposób uproszczony przy pomocy umownych warunków klimatycznych, charakteryzujących właściwości atmosfery miejsca pracy urządzenia, oraz warunków organizacyjno-technicznych wynikających z rodzaju organizacji i procesu produkcyjnego kopalni oraz rozwiązań i właściwości urządzeń [24].

Badania i analizy poszczególnych czynników środowiskowych wykonywane były dotychczas głównie w celu określenia ich wpływu i dla ustalenia wymagań w zakresie bezpieczeństwa załogi i kopalni [8, 10, 11, 38, 39]. Znane są również publikacje wyników badań przeprowadzanych sporadycznie dla potrzeb technicznych, lecz obejmują one tylko wyodrębnione cechy bądź narażenia [5, 12, 40, 46]. Istnieje przeto uzasadniona potrzeba opracowania usystematyzowanej ogólnej charakterystyki czynników środowiskowych polskich kopalń oraz ich korelacji z urządzeniami technicznymi.

Z punktu widzenia możliwości (prawdopodobieństwa) wywoływania określonych narażeń środowiskowych dla urządzeń elektrycznych instalowanych w podziemiach kopalń, jak również z uwagi na uczulenia środowiska na zagrożenia od tych urządzeń, należy uwzględnić przede wszystkim czynniki lub ich zespoły charakteryzujące: powietrze kopalniane, jego skład i tempera-

ture, wilgotność i zapylenie, zawartość gazów wybuchowych i agresywnych oraz wody kopalniane, zawartość soli i innych substancji mineralnych, rośnienie, występowanie i rozwój mikroorganizmów. Jednocześnie konieczne jest zwrócenie większej uwagi również na inne zjawiska charakteryzujące techniczne warunki środowiskowe kopalń, rodzaj i nasilenie, których w znacznej mierze są wynikiem rodzaju organizacji, technologii i techniki wydobycia, specyfiki budowy geologicznej oraz zdarzeń losowych.

Można by wyodrębnić jeszcze inne zespoły czynników środowiskowych podobnie zresztą jak już uprzednio wymienione wzajemnie od nich i siebie uzależnione, dopełniające się, bądź wynikające jedna z drugiej. Czynniki te mogą mieć bezpośredni bądź pośredni wpływ na powstawanie odpowiednich rodzajów narażeń lub zagrożeń. Są to głównie następujące zespoły czynników:

- ruchy górotworu; tąpnięcia i zawały,
- wyrzuty gazów i skał,
- wybuchowość gazów i pyłów, palność materiałów oraz intensywność i sposób przewietrzania,
- nachylenie, grubość i głębokość zalegania pokładów,
- system i zakres robót górniczych; stopień mechanizacji, rodzaj i jakość maszyn górniczych oraz sposób ich eksploatacji,
- brak światła słonecznego i naturalnej wentylacji oraz niedostateczne oświetlenie,
- zwarcia, przepięcia i prądy błędzące,
- jakość konstrukcji, materiałów i wykonania urządzeń elektrycznych, układ sieci i rodzaj zabezpieczeń oraz kultura techniczna ich eksploatacji.

1.2. Narażenia i zagrożenia

Narażenia i zagrożenia charakteryzuje się jakościowo i ocenia ilościowo. Ocenę przeprowadza się według stopnia i rozmiarów nasilenia oraz czasokresu i prawdopodobieństwa występowania czynników środowiskowych. Należy uwzględnić, że poszczególne narażenia i zagrożenia występują stale, inne zaś przejściowo, długotrwałe lub krótkotrwałe. Narażenia lub zagrożenia przejściowe mogą występować:

- systematycznie, tj. nieuchronnie i okresowo,
- doraźnie (wypadkowo), tj. w warunkach awarii lub zbiegu takich okoliczności, któremu usiłuje się przeciwdziałać,
- losowo, tj. pojawiające się tylko przy określonych przypadkowych zbiegach okoliczności, którym z reguły nie można zapobiec.

Należy mieć na uwadze integralność narażeń i zagrożeń w podziemiach kopalni: skutki narażeń są przyczyną zagrożeń, te zaś stwarzają dodatkowo narażenia doraźne.

Szczególnym przypadkiem jest człowiek, który pracując w nieodpowiednich warunkach środowiskowych nie tylko sam staje się wrażliwym na zagro-

żenia i ulega wypadkom, lecz stanowi dodatkowe narażenie dla urządzeń. Tak więc przepisy limitujące skład atmosfery kopalnianej i jej zanieczyszczeń z uwagi na pracę ludzi w sposób pośredni wpływają również na pracę urządzeń elektrycznych. I tak na przykład zawartość tlenu i dwutlenku węgla w powietrzu mają bardzo istotny wpływ na wartość prądu rażenia powodującego określoną reakcję organizmu żywego.

Duża wilgotność względna i podwyższona temperatura mają zasadniczy wpływ na wartość oporu wypadkowego ciała człowieka i opór przejścia. Podwyższona temperatura ma wpływ na pocenie się i zasolenie miejsca dotyku, jak i na zmniejszenie się oporności wewnętrznej ciała ludzkiego. Zwiększenie stopnia uczulenia człowieka na zagrożenie od urządzeń elektrycznych powodują dodatkowe również następujące czynniki: obecność wody zasolonej i zakwaszonej, stały dotyk o dużym nacisku i dużej powierzchni urządzeń, na których może pojawić się napięcie zabłąkane, duże prawdopodobieństwo uszkodzeń mechanicznych naskórka, możliwość dotyku częściami ciała o dużej czułości prądowej i małej oporności (skroń, szyja, przedramię, ramiona, plecy) na skutek pracy bez odzieży, słabe oświetlenie przy dużej jaskrawości, hałas pracujących maszyn i inne. Agresywne gazy i zanieczyszczenia, wilgoć i pył kopalniany oddziałują destrukcyjnie na części przewodzące, izolacyjne i konstrukcyjne urządzeń i elementów automatyki zwiększając ich zawodność.

Narażenia mechaniczne występujące w podziemiach kopalń należałoby podzielić następująco:

- wstrząsy i udary podczas transportu do oddziałów produkcyjnych i przemieszczaniu w ślad za postępem robót górniczych,
- wstrząsy i wibracje w czasie pracy urządzeń lub ich elementów zabudowanych w kadłubach maszyn górniczych, bądź innych urządzeń zespołowych,
- udary spowodowane wyrzutami oraz spadającymi odłankami węgla lub skał,
- statyczne naprężenia ciągnące i ściskające wynikające ze stromości wyrobisk i ruchów górotworu,
- naprężenia dynamiczne spowodowane wyrzutami metanu oraz pyłu węglowego,
- pozostałe narażenia spowodowane innymi urządzeniami technicznymi (np. maszynami roboczymi) i działalnością produkcyjną człowieka (np. robotami strażakowymi).

Niebezpieczeństwo skutków prawdopodobnych zagrożeń dla ludzi i otoczenia oraz innych urządzeń technicznych, zależy od nasilenia zagrożeń i stopnia wrażliwości środowiska. Do podstawowych czynników sprzyjających uczuleniu środowiska górniczego i nasileniu skutków zagrożeń, należy zaliczyć przede wszystkim:

- obecność metanu i pyłu węglowego, oraz węgla, drewna i innych materiałów łatwopalnych,
- obecność zmineralizowanej, dobrze przewodzącej wody, powszechność i duża ilość mas metalowych, oraz duża wilgotność i podwyższona temperatura powietrza,

- brak światła słonecznego i ograniczone możliwości oświetlenia sztuczne-
go, niedostateczna wentylacja, praca bez odzieży, ogólna dostępność ur-
ządzeń oraz stosowanie strzelania elektrycznego,
- koncentracja wydobywania i kompleksowa automatyzacja.

Wpływ wymienionych czynników może być różnorodny. W zasadzie wszystkie z nich w odpowiednim stopniu przyczyniają się do powiększenia ujemnych skutków możliwych zagrożeń elektrycznych, które jakościowo mogą przejawiać się następująco:

- rażenie prądem elektrycznym, bezpośrednio lub pośrednio,
- pożar zapoczątkowany zapłonem wywołanym skutkami cieplnymi przepływu prądu lub łukiem elektrycznym,
- wybuch zainicjowany łukiem, iskrą lub cieplnymi skutkami przepływu prądu elektrycznego,
- przedwczesne odejście zapalników elektrycznych wywołane prądami błędzącymi lub napięciami indukowanymi,
- korozja elektrolityczna powodowana prądami błędzącymi,
- zakłócenia w pracy innych urządzeń, szczególnie łączności, sygnalizacji i sterowania, wywołane polami elektrycznymi i magnetycznymi.

1.3. Koordynacja wymagań

Koordynacja środowiskowa polega na odpowiednim wzajemnym przystosowaniu urządzeń i czynników środowiskowych dla uzyskania bezpiecznej i wydajnej pracy. Urządzenia elektryczne i poszczególne ich składniki powinny być dostatecznie odporne na ujemne wpływy i działania jakim w danym środowisku podlegają, a jednocześnie powinno być ograniczone do minimum prawdopodobieństwo wnoszenia w to środowisko niebezpieczeństwa lub dodatkowych niepożądanych wpływów.

W warunkach podziemi kopalni nieodzowne jest współdziałanie w zakresie przystosowania środowiska (koordynacja bierna) i urządzeń elektrycznych (koordynacja czynna). Pierwszeństwo należy przyznać koordynacji biernej, tzn. odpowiedniemu ukształtowaniu warunków środowiskowych środkami techniczno-organizacyjnymi. W kopalniach gazowych wędzie to dotyczyło przede wszystkim stanu przewietrzania i odmetanowania oraz kontroli ich jakości.

Jednak nie mniej ważna jest również koordynacja czynna polegająca na odpowiednim ustaleniu wymagań w zakresie: konstrukcji, materiałów, wykonania, montażu, użytkowania, konserwacji i kontroli urządzeń oraz ich zabezpieczeń. Wymagania te określa się na podstawie jakościowej i ilościowej oceny narażeń i zagrożeń, przy pomocy parametrów liczbowych, bądź też ustala się na podstawie badań symulowanych. Dla celów badawczych, w oparciu o charakterystykę rzeczywistych warunków środowiskowych, ustala się warunki umowne o podobnym charakterze narażeń i uczuleń na zagrożenia.

Z szeregu właściwości jakimi powinny charakteryzować się górnicze kable i przewody oponowe [36, 37], aby sprostać warunkom występującym w eksploatacji podziemnej należy wymienić przede wszystkim następujące:

- konstrukcja umożliwiająca zastosowanie pewnych w działaniu ochron zapobiegającym porażeniom, pożarom lub zapłonem mieszanki wybuchowej w przypadku uszkodzeń wewnętrznych i zewnętrznych powstałych w dowolnym miejscu kabla przewodu,
- odpowiednia wytrzymałość na działanie sił mechanicznych ciągnących, ścisających, skręcających, rozdzierających i udarowych,
- niepalność lub przynajmniej niepodtrzymywanie i nieprzenoszenie ognia,
- niezmiennosc podstawowych własności elektrycznych przy występującej wilgoci, podwyższonej temperaturze i jonizacji powietrza,
- odporność na destrukcyjne działanie zmineralizowanej wody, atmosfery korozyjnej i mikroorganizmów, oraz prądów błędzących,
- mały ciężar jednostkowy, giętkość i gładkość powierzchni zewnętrznej.

Jednocześnie budowa kabli i przewodów powinna niedopuszczać do powstawania międzyfazowych zwarczeń wewnętrznych oraz ograniczać wpływ pól elektromagnetycznych na obwody sygnalizacji, kontroli i sterowania.

2. PRAWDOPODOBIENSTWO USZKODZEŃ I ZAGROZEŃ

2.1. Podstawy teorii uszkodzeń

Właściwy wybór środków elektryfikacji i automatyzacji podziemi kopalń, dostosowanych do rzeczywistych warunków środowiskowych i zadań jakie mają spełniać, decydują o bezpieczeństwie i pewności ruchu. Najważniejsze są kryteria bezpieczeństwa. Na obecnym etapie rozwoju technologii górniczej słusznie zaczyna się zwracać coraz większą uwagę również na kosztach ruchu. W kosztach ruchu, stanowiących jedną z funkcji kryterium wyboru, występuje oprócz kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych składnik spodziewanych dodatkowych kosztów uszkodzenia, równych iloczynowi powstających kosztów wymiany urządzeń i strat w produkcji na skutek postojów i prawdopodobieństwa ich powstania. Konieczna jest więc znajomość prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń.

Użytkowanie urządzeń należałoby traktować jako proces ich wymiany (odnowienia). Powinno się przyjąć, że w ruchu górniczym eksploatacja urządzeń może być prowadzona do planowej wymiany okresowej, jeszcze przed wystąpieniem uszkodzeń. Jest to warunek wynikający z kryteriów bezpieczeństwa. Profilaktyka taka jest możliwa, gdy znane są charakter narażeń i prawdopodobieństwo występowania uszkodzeń oraz związane z nimi prawdopodobieństwo nieszczęśliwych wypadków i strat materialnych.

Z tych względów optymalizacja wyboru środków elektryfikacji i automatyzacji wymaga przeprowadzenia wielu obserwacji i badań eksperymentalnych niezbędnych dla ustalenia kryteriów.

Zgodnie z teorią niezawodności działania urządzeń technicznych, uszkodzenia, podobnie jak inne pojęcia pochodne, można traktować jako zmienne losowe o pewnym rozkładzie prawdopodobieństwa [9, 15, 35, 37]. Niestety - śliwie wypadki w górnictwie - np. porażenia, wybuchy i zapłony oraz przedwczesne odejścia zapalników elektrycznych - to również złożone zdarzenia losowe. Są one wynikiem nałożenia się wielorakich czynników przypadkowych powodujących: uszkodzenie urządzenia elektrycznego, powstanie zagrożenia oraz uczulenie środowiska na powstałe zagrożenie. Ocena ich oraz oszacowanie rozkładów prawdopodobieństw są możliwe w oparciu o teorię statystyki matematycznej.

Podstawowym pojęciem teorii niezawodności jest pojęcie uszkodzenia obiektu. W warunkach górniczych należy je rozumieć jako zdarzenie losowe, powodujące pełną lub częściową utratę przez urządzenie pewnych właściwości warunkujących jego poprawne działanie zapewniające bezpieczną i wydajną pracę.

Uszkodzenie jest wynikiem oddziaływania na urządzenie funkcji wymuszającej w określonym czasie, przede wszystkim czynników środowiska górniczego, o takim nasileniu, że przekraczają one odporność względnie wytrzymałość urządzenia w ciągu tego czasu.

Czynniki te występują zarówno w stanie działania urządzeń jak i w stanach jałowych. Są one trudno wyznaczalne z uwagi na ich stochastyczny oraz antropotechniczny charakter.

W dwustanowym ujęciu klasyfikacji stanów urządzenia, uszkodzenie jest dyskretnym przejściem ze stanu sprawności do stanu niesprawności urządzenia.

Ujęcie takie odpowiada przede wszystkim uszkodzeniom przypadkowym (losowym), zwanym też katastrofalnymi. Zachodzi tam skokowe przejście ze stanu sprawności, w którym spełniane są w danej chwili główne parametry niezbędne dla wykonywania określonych funkcji, do stanu niesprawności. Występują one niespodziewanie, nagle i szybko mimo braku objawów pogarszania się właściwości funkcjonalnych urządzenia. Omówione uprzednio specyficzne grupy czynników środowiska górniczego sprzyjają powstawaniu uszkodzeń tego rodzaju. Uszkodzenia te są w większości przypadków nieodwracalne, nie dające się usunąć i powodujące zazwyczaj konieczność wymiany urządzenia.

Uszkodzenia mogą być spowodowane również błędami w projektowaniu i wykonawstwie oraz niewłaściwą eksploatacją urządzenia. Ujawniają się zwykle w badaniach kontrolnych i odbiorczych oraz w początkowym okresie eksploatacji. Gdy mechanizm uszkodzeń jest taki, że mogą występować odmowy częściowe, w wyniku stopniowego pogarszania się właściwości, na skutek czynników działających okresowo (znanych i zdecydowanych) lub nawet przypadkowo - mówimy wtedy o uszkodzeniach naturalnych (starzeniowych). Wówczas zdolność urządzenia do poprawnego działania może być traktowana jako stopniowana (częściowa). Zmusza to do wielostanowego ujęcia (opisu) zjawiska.

Informacje a priori o zbliżaniu się uszkodzenia naturalnego można uzyskać w wyniku badań symulowanych względnie kontrolnych oraz z okresowych inspekcji. W pewnych przypadkach do uszkodzeń tych można również nie dopuścić, względnie zmniejszyć ich prawdopodobieństwo przez odpowiednie profilaktyczne zabiegi konserwacyjne. Zazwyczaj jednak, z uwagi na nieuchronność procesów starzeniowych, uzyskuje się tylko zwiększenie trwałości urządzenia.

Przeciwnieństwem uszkodzenia Q obiektu jest jego niezawodność R . Określana jest ona jako prawdopodobieństwo nie wystąpienia uszkodzenia w ciągu czasu t w przedziale czasowym $(0, t_1)$ i w zespole czynników wymuszających opisanych wektorem losowym $\Psi(t)$:

$$R(t) = P \{ x = 0, t \} \quad (2.1)$$

gdzie x jest liczbą uszkodzeń w czasie t .

Uszkodzenie można określić analogicznie:

$$Q(t) = P \{ x \geq 1, t \} \quad (2.2)$$

Niezawodność $R(t)$ i uszkodzenie $Q(t)$ są więc funkcjami czasu w ciągu którego występuje oddziaływanie czynników wymuszających $\Psi(t)$. Rozpatrywane z uwzględnieniem zależności od czasu noszą nazwy funkcji niezawodności, względnie zawodności.

Trwałość urządzenia (elementu) jest drugim podstawowym pojęciem teorii niezawodności. Trwałość - zwana również długowiecznością, żywotnością, a także czasem trwania, użytkowania lub życia może być definiowana jako pewna właściwość urządzenia, jak i wielkość charakteryzująca tę właściwość. Wielkość fizyczną trwałości wyraża się w jednostkach czasu, bądź proporcjonalnych do czasu (np. liczbą operacji) - od pewnej chwili przyjętej umownie za początkową do chwili wystąpienia uszkodzenia, powodowanego oddziaływaniem zespołu losowych czynników wymuszających $\Psi(t)$.

Trwałość traktowana jest więc jako zmienna losowa T typu ciągłego, mogąca przyjmować wartości rzeczywiste $t \in T$ z przedziału $(0, \infty)$. Stosunkowo łatwo jest określić trwałość retrospektywną (jaka była) na podstawie odpowiednio dokładnych obserwacji. Trwałość przewidywana (prospektywna) jest pojęciem probabilistycznym. Można ją oceniać w oparciu o informacje z przeszłości - obserwacje i wyniki badań symulowanych w postaci danych statystycznych, dotyczących urządzeń analogicznych poddanych działaniu czynników wymuszających $\Psi(t)$ o znanym rozkładzie.

W warunkach rzeczywistych, gdy ma się do czynienia ze zbiorem urządzeń fizycznie jednorodnych, trwałość dowolnego urządzenia z rozważanego zbioru, rozumiana jako czas do pierwszego uszkodzenia, stanowi jedynie jedną realizację zmiennej losowej T . Postać i parametry rozkładu mogą być osza-

cowane, na podstawie wyników badań reprezentatywnej próbki losowej, metodami analizy statystycznej lub nieparametrycznie w postaci graficznej.

Dystrybuantą trwałości $F(t, \Theta)$ nazywa się prawdopodobieństwo zdarzenia, że zmienna losowa T przyjmuje wartości nie większe niż t . W ogólnym zapisie można to przedstawić następująco:

$$F(t, \Theta) \Big| \varphi(t) = P \{ T \leq t \} = \int_0^t f(t, \Theta) dt \quad (2.3)$$

gdzie: $f(t, \Theta) = f(t, \Theta_1, \dots, \Theta_n)$ funkcja gęstości trwałości T ,
 $\Theta_1, \dots, \Theta_n$ - parametry rozkładu.

Trwałość urządzenia może być określana liczbowo, za pomocą twierdzeń o wartości oczekiwanej, średnim czasem pracy T_0 do pierwszego uszkodzenia, względnie czasem T_{sr} między sąsiednimi uszkodzeniami. Zgodnie z borelowskim prawem wielkich liczb czas oczekiwany T może być przyjmowany w przybliżeniu jako równy średniej arytmetycznej z czasów sprawnej pracy wielu urządzeń jednorodnych. W ocenie dyspersji czasów sprawnej pracy posługujemy się znanymi z rachunku prawdopodobieństwa pojęciami wariancji σ^2 lub odchylenia standardowego σ .

Opis przewidywanego prawdopodobieństwa uszkodzeń, przy oddziaływaniu określonych zespołów czynników wymuszających $\varphi(t)$ umożliwiają dodatkowo dwa pojęcia: częstość oraz intensywność uszkodzeń. Ich wartości otrzymujemy ze statystyki uszkodzeń w eksploatacji, bądź z wyników laboratoryjnych badań przyspieszonych.

Funkcja gęstości uszkodzeń może być odwzorowywana według różnych praw rozkładu: Poissona, Gaussa-Laplacea, logarymiczno-normalnego, gamma, wykładniczego lub Weibulla. Weryfikację zgodności dystrybuanty złożonej z zaobserwowaną (empiryczną) przeprowadza się w przyjętym przedziale ufności, posługując się testami zgodności. Dla urządzeń elektrycznych najczęściej stosowany jest rozkład wykładniczy lub Poissona, względnie bardziej ogólny rozkład Weibulla. Rozkłady rzeczywiste uszkodzeń można z dostateczną dokładnością aproksymować do prawa wykładniczego. Uzyskuje się wtedy znaczne uproszczenie aparatu matematycznego i pozwala to stosować w praktyce proste i wygodne inżynierskie metody oceny parametrów niezawodności. Przy takim rozkładzie zbieranie danych statystycznych można rozpoczynać niezależnie od okresu eksploatacji.

2.2. Skutki uszkodzeń.

Uszkodzenia elektrycznych urządzeń górniczych mają duży wpływ na stan bezpieczeństwa załogi i ruchu górniczego oraz na dodatkowe straty materialne, wynikające z przerw w procesie produkcji górniczej. Praktycznie każde uszkodzenie wywołuje w kopalni stan zagrożenia, zwiększając prawdopodobieństwo występowania nieszczęśliwych wypadków. Dla powstania pożaru

lub zapłonu konieczne jest zaistnienie jednocześnie: stanu zagrożenia oraz odpowiednich, sprzyjających warunków otoczenia. Dla wypadku rażenia prądem elektrycznym konieczne jest jeszcze dodatkowo dotyk bezpośredni lub pośredni urządzenia, na którym wystąpiło napięcie rażenia.

W liczbach bezwzględnych najczęściej rejestrowanych jest wypadków porażenia a najmniej zapłonów: metanu, gazów pożarowych i pyłu węglowego [20].

Wpływ uszkodzeń poszczególnych grup rodzajowych urządzeń górniczych na kształtowanie się wypadkowości nie jest jednakowy. Z analizy wypadków pożarów zarejestrowanych w Polsce i innych krajach wynika, że pożary elektryczne stanowią średnio od 30,9% do 74,5% pożarów egzogenicznych. Największe zagrożenie pożarowe z przyczyn elektrycznych stwarzały kable i przewody oraz łączniki.

W wyniku analizy wieloletnich danych statystycznych [2,6] można stwierdzić, że urządzenia elektryczne były także przyczyną średnio jednej trzeciej (22-45%) wszystkich wybuchów metanu oraz pyłu węglowego w kopalniach. Większe zagrożenie stanowią tylko roboty strzałowe. Wśród urządzeń elektrycznych najczęściej wybuchów spowodowały uszkodzone kable i przewody oponowe: średnio 50-62% wszystkich wybuchów zaistniałych z przyczyn elektrycznych.

W głównej mierze były to zwarcia w przewodach oponowych, powstałe w wyniku uszkodzenia ich maszynami przodkowymi oraz robotami strzałowymi. Pozostałe przyczyny, to przede wszystkim: naruszenie ognioszczelności aparatów i silników, oraz uszkodzenie kloszy lamp oświetlenia elektrycznego.

Wypadki porażenia elektrycznych w mniejszym stopniu niż pożary i wybuchy uzależnione są od uszkodzeń urządzeń elektrycznych. Dotyk części urządzeń, które znajdują się w stanie sprawnym pod niebezpiecznym napięciem rażenia, jest bardziej prawdopodobny niż pożar lub zapłon spowodowany przez urządzenie nieuszkodzone. Przyczyną wypadków porażenia są w większości: nieodpowiedni sposób pracy oraz nieprzestrzeganie przepisów i instrukcji [21].

Następstwem uszkodzeń urządzeń elektrycznych mogą być również bardzo poważne straty materialne. Straty związane bezpośrednio lub pośrednio z opisywanymi wyżej wypadkami są oczywiste, chociaż często nie w zupełności wymierne. Natomiast stosunkowo łatwo można ocenić spodziewane straty wynikające z przerw w dostawie energii do oddziału wydobywczego - spowodowane uszkodzeniami elektrycznych urządzeń oddziałowych.

W sieciach dołowych nie stosuje się samoczynnego powtórnego załączania i samoczynnego włączania rezerwy. Układ sieci oddziałowej z punktu widzenia pewności zasilania odbiorników górniczych, wzajemnie uzależnionych procesem technologicznym, można by traktować jako układ o szeregowo połączonych elementach. Zgodnie z teorią niezawodności, w układzie szeregowym uszkodzenie elementu powoduje niesprawność całego układu. W układzie takim prawdopodobieństwo ciągłości dostawy energii R_0 równe jest iloczynowi niezawodności cząstkowych R_1 (traktowanych jako zdarzenie niezależne) poszczególnych elementów układu.

Możemy więc zapisać

$$R_0 = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.4)$$

$$Q_0 = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.5)$$

W przypadku gdy prawdopodobieństwo Q_i uszkodzeń poszczególnych elementów są stosunkowo bardzo małe, a liczba n elementów włączonych szeregowo nie jest zbyt duża, przyjmujemy

$$Q_0 \approx \prod_{i=1}^n Q_i \quad (2.6)$$

3. KRYTERIA BEZPIECZNEJ ELEKTRYFIKACJI I AUTOMATYZACJI PODZIEMI KOPALNI

3.1. Istota problemu

Bezpieczeństwo - to zespół zagadnień wzajemnie uzależnionych. Mają one nie wpływ wszystkie rodzaje zagrożeń, które w sprzyjających warunkach mogą spowodować niebezpieczne skutki. Niezawodność układów technicznych to nie tylko zagadnienie techniczno-ekonomiczne, lecz w wielu przypadkach również podstawowy problem bezpieczeństwa.

Wybuchy i pożary elektryczne mogą być wywołane przez iskrę, łuk elektryczny lub nagrzanie się urządzeń do odpowiednio wysokiej temperatury. Decyduje o tym wartość mocy wydzielanej w odpowiednim czasie, na przykład w miejscu zwarcia: U_z , I_z , R_z , t_z .

O niebezpiecznych skutkach przepływu prądu przez organizm żywy decyduje również ilość energii - natężenie prądu rażenia I_R , zależne od częstotliwości f , napięcia rażenia U_R i oporu ciała człowieka R_C oraz czasu rażenia t_R . Wymienione wartości napięć i prądów warunkowane są parametrami układu elektroenergetycznego takimi jak: napięcie robocze U_B , częstotliwość f_B , rezystancja R_B , indukcyjność L_B oraz pojemność C_B . Jednocześnie stale lub okresowo występuje oddziaływanie zespołu czynników technicznych warunków środowiskowych $\Psi(t)$, które sprzyjają powstawaniu uszkodzeń i uczulają środowisko na zagrożenia. Należy uwzględnić również wpływ czynników Θ wynikających ze świadomej działalności profilaktycznej, a m.in.: system wybierania złożeń i sposób oraz intensywność przewietrzania, układ sieci, rodzaj konstrukcji i jakość wykonania urządzeń i elementów, czułość i niezawodność oraz wybiórczość zabezpieczeń.

W takim rozumieniu bezpieczeństwo elektryfikacji B_e analitycznie można zapisać w postaci ogólnej jako następującą funkcję:

$$B_e = B(U, I, f, R, L, C, t, \Psi, \Theta) \quad (3.1)$$

Jest to funkcja wielu zmiennych, zależna od zdarzeń przypadkowych. Dlatego też ścisła ilościowa ocena stopnia kompleksowego bezpieczeństwa nie jest możliwa. Natomiast wynika z niej celowość i możliwość, a nawet konieczność wielokierunkowego działania.

Efektywność stosowanych środków ochronnych ocenia się w zależności od prawdopodobieństw: powstania otwartego iskrzenia lub łuku elektrycznego względnie wydzielania się dostatecznej ilości ciepła, pojawienia się niebezpiecznego napięcia na obudowach względnie dotyku części będących pod napięciem, wyłączeń zasilania elektrycznego w wyniku reakcji na powstałe zagrożenie.

Prawdopodobieństwo P_w powstania wypadku wybuchu, pożaru lub rażenia elektrycznego zależy od prawdopodobieństwa P_z wystąpienia zagrożenia i prawdopodobieństwa P_o zaistnienia w tym samym czasie uczulenia na to zagrożenie bezpośredniego otoczenia.

Uwzględniając, że są to zdarzenia niezależne i jednakowo możliwe, prawdopodobieństwo wypadkowe jest iloczynem:

$$P_w = P_z \cdot P_o \quad (3.2)$$

Prawdopodobieństwa składowe P_z i P_o zależą również od wielu zdarzeń przypadkowych. Można by je określić prawdopodobieństwami cząstkowymi. Na przykład w przypadku określenia prawdopodobieństwa wybuchu metanu należałoby znać prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń: odpowiedniego uszkodzenia, wystąpienia iskry lub łuku o dostatecznej energii bądź nagrzania do temperatury zapłonu, wydzielania się metanu, tworzenia się mieszanki wybuchowej w otoczeniu "uszkodzenia" oraz utrzymania dostatecznej i niezawodnej wentylacji wyrobisk. Nie zawsze są to zdarzenia niezależne i należy traktować je jako prawdopodobieństwa warunkowe.

Jak wspomniano, działalność, niezbędna dla zachowania odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa elektryfikacji i automatyzacji, musi być prowadzona w wielu "kierunkach i płaszczyznach". Celem jej jest zmniejszenie prawdopodobieństw poszczególnych zdarzeń "elementarnych". Głównym zadaniem profilaktyki elektrycznej jest zmniejszenie do możliwego minimum prawdopodobieństw zdarzeń składających się na zagrożenia elektryczne. W szczególności należy ograniczyć możliwość dotyku bezpośredniego części prąd wiodących, lub które znalazły się pod napięciem oraz możliwość wystąpienia otwartego iskrzenia lub łuku elektrycznego. W pozostałych przypadkach powodujących zagrożenia wartości prądów, napięć i mocy, powinny być dostatecznie małe i występować tylko w określonym czasie oraz w określonym miejscu.

W urządzeniach automatyki elektrycznej dotrzymanie wysokiego stopnia bezpieczeństwa jest praktycznie możliwe. Uzyskuje się je w wyniku zastosowania odpowiedniej budowy - przede wszystkim budowy iskrobezpiecznej. Wymagane tam wartości prądów i napięć oraz energii mogą być tak małe, że moż-

na zapewnić bezpieczeństwo: rażeniowe, pożarowe i wybuchowe, tak w stanach roboczych jak i awaryjnych.

Baczną uwagę należy jednak zwracać na zagrożenia pośrednie oraz wtórne. Można by tutaj wymienić praktycznie możliwy wpływ obwodów elektroenergetycznych na obwody automatyki - na przykład indukowanie napięć w obwodach sterowania maszyn prowadzonych wspólnie z obwodami roboczymi. Szczególnie istotne jest zagadnienie niezawodności działania układów automatyki, nie tylko z punktu widzenia ciągłości produkcji, lecz również stwarzania niebezpiecznych zagrożeń względnie sprzyjających warunków otoczenia w wyniku wyeliminowania z układu pewnych urządzeń czy środków ochrony.

W realnych układach elektroenergetycznych bezpośredni dotyk części prąd wiodących jest praktycznie zawsze niebezpieczny dla życia ludzkiego. Również bezpośrednie zwarcie w układzie, z uwagi na dużą moc, przedstawia potencjalne zagrożenie wybuchem lub pożarem elektrycznym. Dlatego tak dużą uwagę zwraca się na zagadnienie "odizolowania", bezpośredniego lub pośredniego, części pod napięciem od otoczenia zewnętrznego. Można więc założyć, że większość zagrożeń elektrycznych, łącznie z zagrożeniem od prądów błądzących, powodowana jest prądami upływu przez izolację - w wyniku monotonicznego pogarszania się stanu izolacji lub jej nagłego, najczęściej mechanicznego, uszkodzenia.

Najbardziej prawdopodobne są jednofazowe uszkodzenia izolacji. Na nie też zwraca się główną uwagę w działalności profilaktycznej. Z tych względów przewagę posiada układ sieci izolowany względem ziemi, w którym wartości napięć, prądów i mocy zwarcia doziemnego mogą być względnie małe.

Wewnętrzne zwarcia międzyfazowe w urządzeniach chronionych odpowiednio mocną osłoną, na przykład ognioszczelną, w wielu przypadkach nie są bardziej groźne niż jednofazowe - jeżeli zostaną dostatecznie szybko wyłączone. Ewidentne zagrożenie stwarzają zwarcia między fazami wewnątrz kabli i przewodów. Zwarcia tego rodzaju w większości przypadków mogą powodować rozerwanie zewnętrznych powłok ochronnych i wyrzucenie na zewnątrz iskier lub łuku elektrycznego. Nie wystarcza ograniczenie czasu zwarcia od 0,1 s jak to dotychczas przyjmowano na podstawie wyników badań wykonanych w NRF. Potwierdzenie tego uzyskano podczas specjalnych badań przeprowadzonych prądem przemiennym 50 Hz w zwarciozni górniczej Zakładu Badań Elektrycznych ZKMPW.

Z analizy szczegółowych materiałów 167 prób zwarciovych wynika, że w zasadzie przy każdym zaistniałym łukowym zwarciu 3-fazowym następowało: przerwanie ciągłości żył, wypalenie względnie rozerwanie powłok ochronnych - detonacja oraz wyrzut łuku, iskier i gazów.

3.2. Rażenia elektryczne

Skutki przepływu prądu elektrycznego przez organizm ludzki są różnorodne i zależą od parametrów źródła prądu oraz właściwości elektrycznych i biofizycznych ustroju rażonego. Są to głównie następujące czynniki:

- natężenie i rodzaj prądu oraz kształt krzywej i częstotliwość,
- czas i droga przepływu prądu,
- osobnicze właściwości konstytucjonalne i kondycyjne organizmu rażonego, takie jak zmęczenie fizyczne i psychiczne, napięcie emocjonalne, przyzwyczajenie do udarów elektrycznych, czynnik zaskoczenia lub uwagi i inne.

Z punktu widzenia profilaktyki przemysłowej celowe jest wprowadzenie dwóch stopni bezpieczeństwa, dla których wartości natężenia i czasu przepływu powinny być ściśle określone [19]:

- prąd graniczny dopuszczalny długotrwale I_{rd} ,
- prąd graniczny dopuszczalny krótkotrwale I_{rk} , czyli tzw. prąd względnie bezpieczny.

Analizując wyniki badań dochodzimy do wniosku, że średnie wartości minimalnych prądów fibrylacji I_{rk} uzyskiwane przez różnych badaczy, dla określonych przedziałów czasu rażenia t_r można w przybliżeniu opisać zależnością matematyczną o następującej postaci ogólnej:

$$I_{rk} = at_r^{-n} + b \quad (3.3)$$

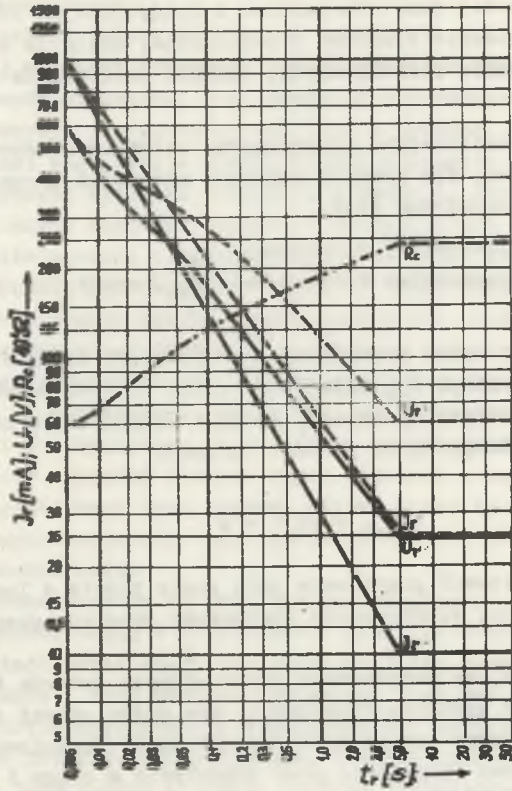
Można je więc przedstawić graficznie jako linie proste w logarytmicznym układzie współrzędnych; współczynnik kierunkowy prostych przybiera wartości $n = 0,5 \div 0,85$.

Należy podkreślić, że proponowane przez różnych autorów średnie wartości prądów, które nie powodują fibrylacji, nie można uważać za bezwzględnie bezpieczne. Statystyczne opracowanie wyników badań Kisielowa wykazało, że gdy prawdopodobieństwo fibrylacji przy przepływie w ciągu 3 sekund prądu o średniej wartości obliczeniowej wynosi 0,5, to przy 0,3 wartości obliczeniowej prądu prawdopodobieństwo fibrylacji wynosi tylko 0,0027.

Dla praktycznych celów ustalenia środków ochrony i kryteriów oceny bezpieczeństwa rażenia, konieczna jest znajomość chociażby przybliżonych wartości wypadkowego oporu - w określonych warunkach pracy i środowiska. Z uwagi na mnogość uprzednio wymienionych czynników pierwszeństwo należy przyznać wynikom eksperymentalnym i sprawdzonym metodami statystycznymi.

Analiza statystyczna wyników badań Bładowskiego i Teresiaka [3,42] wykazała również, że rozkład gęstości wyników pomiarów jest wyraźnie niesymetryczny, o skośności dodatniej - wartość modalna jest znacznie mniejsza od wartości średniej. Uwzględniając powyższe spostrzeżenia, obliczeniową wartość oporu człowieka w funkcji napięcia należy ustalić poniżej wartości modalnych, zakładając wymagany kwantyl prawdopodobieństwa odpowiedniego rzędu, zależnie od spodziewanych warunków środowiskowych.

Przy ustalaniu granicznych wartości prądów i napięć rażenia oraz odpo- wiadających im rezystancji ciała człowieka przy pracy w podziemiach kopalń, uwzględniono również konieczność zachowania możliwości samodzielnie-



Rys. 1. Dopuszczalne wartości prądów I_T i napięć U_T rażenia ciała ludzkiego jako funkcja czasu rażenia t_r
 - - - - - prąd przemienny 50 Hz, - - - - - prąd stały

go przerwania obwodu przez osobnika rażonego, nawet w przypadku dokonania uchwytu całą dłonią.

Graniczny prąd rażenia I_{rd} dopuszczalny "długotrwałe" może być więc równy w takich przypadkach co najwyżej tzw. prądowi uwolnienia samodzielnego. Uwzględniając wyniki badań uzasadniono [20], że dla prądu przemiennego należy przyjąć:

$$\begin{aligned} I_{rd} &\leq 10 \text{ mA} \\ t_{rd} &> 5 \text{ s} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dopuszczalne odpowiednio większe wartości natężenia prądu rażeń krótkotrwałych (poniżej 5 s) określa się przy założeniu, że czas przepływu prądu zostanie niezawodnie ograniczony do wymaganej wartości przez właściwe zabezpieczenie.

$$I_{rk} = 30 t_r^{-0,667}, \text{ mA} \quad (3.5)$$

dla

$$0,005 < t_r < 5$$

gdzie t_r - czas rażenia, s

Uwzględniając przyjęte dopuszczalne wartości przmiennych prądów rażenia oraz wartości oporu ciała ludzkiego obliczyć możemy dopuszczalne wartości napięć rażenia: długotrwałego U_{rd} oraz krótkotrwałego U_{rg} , dla prądu przmiennego 50 Hz oraz prądu stałego.

$$U_{rd} = I_{rd} R_{cd} \leq 10.2400 \cdot 10^{-3} \leq 24 \text{ V} \quad (3.6)$$

$$U_{rk} \leq 30 t_r^{-0,667} (4,17 - 1,285 \log U_r), \text{ V} \quad (3.7)$$

$$I_{rd} \leq 25 \text{ mA} \quad (3.8)$$

$$I_{rk} \leq 60 t_r^{-0,55}, \text{ mA}$$

$$U_{rd} \leq 60 \text{ V} \quad (3.9)$$

$$U_{rk} \leq 60 t_r^{-0,55} (4,17 - 1,285 \log U_r), \text{ V}$$

Obliczone wartości bezpiecznych napięć i prądów rażenia przedstawiono wykreślić na rys. 1.

3.3. Zapłony elektryczne

Powstające w urządzeniach elektrycznych: iskra, łuk, wyładowania pełne lub nagrzanie do wysokiej temperatury, mogą spowodować zapłon materiałów łatwopalnych znajdujących się w otoczeniu urządzeń.

Najczęściej elektrycznym inicjatorem wybuchu może być iskrzenie powstałe przy rozwieraniu elektrycznego obwodu z indukcyjnością, względnie przy zwieraniu obwodu z pojemnością.

Iskrzenie powstaje w wyniku zmiany stanu obwodu na skutek przechodzenia energii pola magnetycznego w energię pola elektrycznego

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \approx \frac{1}{2} C U^2 \quad (3.10)$$

Ponieważ czas rozładowania jest bardzo krótki, dlatego też przy małych pojemnościach powstają bardzo duże przepięcia, które sprzyjają zapłonem. Ta sama energia iskry rozładowana w krótszym czasie, a więc o większej mocy, posiada większą zdolność zapalną, ponieważ decyduje ilość wydzielonego ciepła i przyrost temperatury.

Wyładowania jednoiskrowe tej samej energii są bardziej niebezpieczne od wieloiskrowych.

Złożoność zjawisk występujących przy zapłonie jest przyczyną uniemożliwiającą analityczne ustalenie jego charakteru.

Stało się to możliwe dopiero po przeprowadzeniu odpowiednio wielu badań statystycznych oraz zastosowaniu metod rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Otrzymuje się wtedy w przybliżeniu stałą wartość statystycznego prawdopodobieństwa zapłonu [32]

$$P = \frac{m}{n} = \text{constans} \quad (3.11)$$

gdzie:

m - liczba zarejestrowanych wybuchów

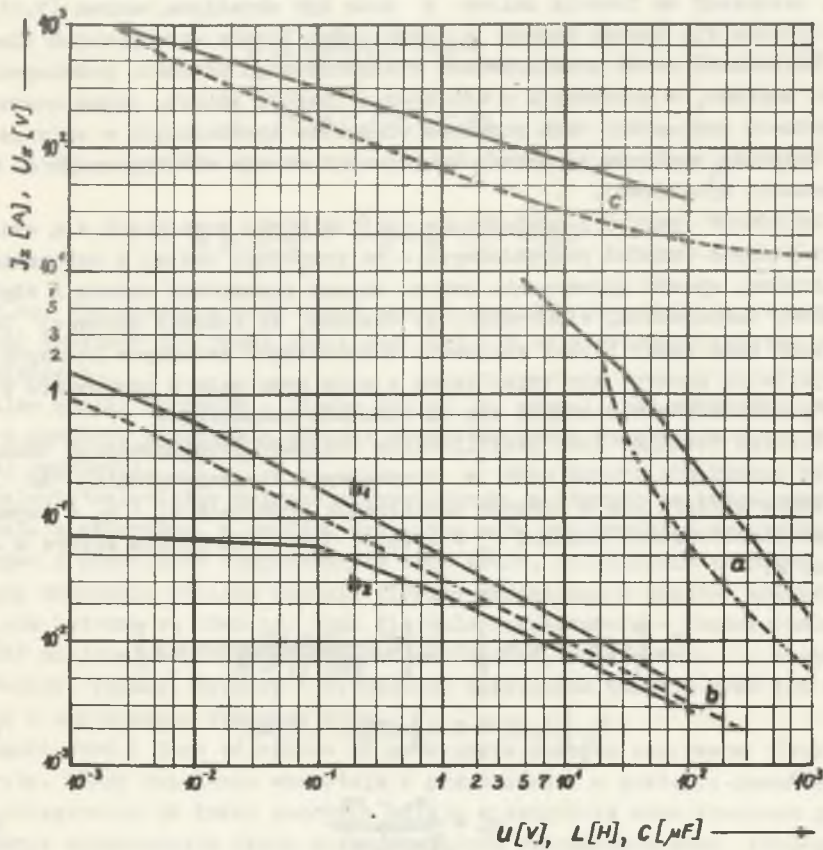
n - liczba wykonanych prób (iskrzeń),

przy czym niezbędna liczba prób na zależy od wymaganego poziomu ufności określanego prawdopodobieństwa zapłonu.

Zakładając

$$P = \text{const} \cdot I^a \quad (3.12)$$

Możliwe jest określenie prądu iskrobezpiecznego ($p = 10^{-8}$) podstawie znajomości prądu zapalającego I_z o znanym prawdopodobieństwie. Jako minimalny prąd zapalający I_z w obwodzie rezystancyjnym i indukcyjnym przyjmuje się zwykle wartość prądu, która wywołuje zapłon mieszanki wybuchowej z prawdopodobieństwem $P = 10^{-3}$. Podobnie przyjmowane jest minimalne napięcie zapalające U_z dla obwodu pojemnościowego (rys. 2).



Rys. 2. Wartości zapalających prądów I_z i napięć U_z w funkcji wartości napięcia U źródła oraz indukcyjności L i pojemności C obwodu - dla prawdopodobieństwa zapłonu mieszanki o zawartości 8,5% CH_4 : $P = 10^{-3}$
 a) $I_z = f(U)$ w obwodzie rezystancyjnym ($L \leq 10^{-4}\text{H}$), b) $I_z = f(L)$; $b_1 - U = 10\text{V}$, $b_2 - U = 250\text{V}$, c) $U_z = f(C)$

Pobierając próbę o n elementach ze zbioru mającego pewne cechy wspólne, zakładamy że frakcja zbioru p może być określona wzorem (3.11). Jest to słuszne dla bardzo dużych n oraz dużej liczby wyróżnionych elementów m . Dokładność oceny prawidłowości statystycznego pomiaru prawdopodobieństwa zapłonu, w porównaniu z wielkością frakcji zbioru, można ocenić na podstawie znajomości cech rozkładu elementów wyróżnionych w zbiorze.

Częstość zapłonów warunkują właściwości obwodu elektrycznego i składu mieszanki wybuchowej.

Zmienność częstości uzależniona jest od wielu sumujących się wzajemnie niezależnych działań przypadkowych - na przykład: rodzaj i wykonanie iskrownika, sposób wytwarzania iskry, zmiany parametrów obwodu i błędów pomiarów, temperatura, ciśnienie itp. Wiadomo, że rozkład zmiennej losowej będącej sumą dużej ilości wzajemnie niezależnych zmiennych losowych jakiegokolwiek natury, aby tylko każda z nich była mała w porównaniu z sumą, nie powinien zbytnio różnić się od rozkładu normalnego.

Rozkład normalny jest przybliżeniem rozkładu dwumianowego. W takim przypadku określenie liczby prób n niezbędnych dla zapewnienia, że liczba zapłonów zawiera się w pewnych określonych granicach m_1 i m_2 z wymaganym prawdopodobieństwem ufności P_u - możliwe jest stwierdzenie Moivre'a - Laplace'a:

$$P_u \left\{ m_1 < m < m_2 \right\} = P_u \left\{ \alpha \leq \frac{n - np}{\sqrt{np(1-p)}} \leq \beta \right\} \quad (3.13)$$

$$P_u \left\{ m_1 < m < m_2 \right\} \approx F(\beta) - F(\alpha) \quad (4.14)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{m_1 - np}{\sqrt{np(1-p)}} \quad (3.15)$$

$$\beta = \frac{m_2 - np}{\sqrt{np(1-p)}} \quad (3.16)$$

$$F(x) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

W przypadku odchyżeń symetrycznych ($\alpha = -\beta$) możemy zapisać

$$P_u \left\{ \frac{n - np}{\sqrt{np(1-p)}} \leq \beta \right\} \approx 2 F(\beta) - 1 \quad (3.17)$$

Założmy, że wymagany poziom ufności wynosi $P_u = 0,95$, a dopuszczalne względne odchylenie liczby zapłonów $b = \frac{m_2}{np} = 1,5$

Podstawiając do wzorów (3.16) oraz (3.17) otrzymujemy:

$$n \geq \left(\frac{\beta}{b-1}\right)^2 \frac{1-p}{p} \quad (3.18)$$

$$2F(\beta) - 1 = 0,95$$

$F(\beta) = 0,975$ - z tablic dla całki Laplace'a otrzymujemy, że $\beta = 1,96$

$$n \geq \left(\frac{1,96}{0,5}\right)^2 \frac{1-p}{p} \approx 15,4 \frac{1-p}{p}$$

Znaczy to: dla liczby n prób można uważać przy 95% pewności, że otrzymana częstość zapłonów nie różni się więcej niż 50% od prawdopodobieństwa ich wystąpienia p .

Znając wyniki pomiarów - liczbę iskier n oraz liczbę zapłonów m - można w dowolnym przedziale ufności sprawdzić jakie są granice p_1 i p_2 badanej populacji.

Zapalenie materiałów palnych w wyrobiskach, w których są instalowane urządzenia elektryczne, w ogólnym przypadku może być wynikiem działania prądu upływu i przeciążeń długotrwałych oraz zwarć, szczególnie łukowych. Decydujące znaczenie posiada energia cieplna wydzielana w miejscu uszkodzenia, lecz istotne są również: stan fizyczny uszkodzenia - powierzchnia i objętość miejsca uszkodzenia, warunki chłodzenia, spiętrzenie i rozkład temperatury; rodzaj, wymiary i wilgotność materiałów palnych oraz ich odległość i usytuowanie względem łuku.

Długość łuku i jego odległość od materiałów palnych odgrywają decydującą rolę. Czasy zapalenia wzrastają w przybliżeniu w postępie geometrycznym z odległością od łuku; podobnie maleją z długością łuku. Konieczne jest stosowanie odpowiednich osłon zapobiegających wystąpieniu łuku otwartego w otoczeniu materiałów palnych oraz ograniczenie do minimum długości łuku, natężenia prądu i czasu jego przepływu. Szczególnie dotyczy to zwarć międzyfazowych.

Badano skutki zwarć w kablach i przewodach górniczych. Wykazano, że nie wystarcza ograniczenie czasu zwarcia do 0,1 s, jak to dotychczas przyjmowano. Energia cieplna łuku elektrycznego, wydzielana w miejscu zwarcia nawet w stosunkowo krótkim czasie, powoduje wypalenie względnie rozerwanie powłok zewnętrznych oraz wyrzucenie iskier i łuku na zewnątrz. Wartość tej energii zawierała się w granicach od 2800 do 4800 J. Mniejsze wartości energii, od 300 do 1500 J powodowały "rozdęcie" powłok, bez widocznych uszkodzeń zewnętrznych.

Dodatkowo przeprowadzono badania zapalności niektórych materiałów jako skutku zwarć wewnętrznych w kablu typu AKSft 3 x 120 mm² + 70 mm², 1 kV. Napięcie probiercze wynosiło 525 V, a spodziewany prąd zwarcia 6000 A. Zaobserwowano, że w wyniku rozrywania powłok zewnętrznych kabla i wyrzucania

nia łuku na zewnątrz, występowały zapłony znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie: drzazg i heblowin z suchego drewna sosnowego posypanych pyłem węglowym w czasie $t_z \approx 0,04s$; szmat natłuszczonych olejem mineralnym juty i papieru kablowego oraz drobnego pyłu węglowego - w czasie zwarcia $t_z \approx 0,01 s$.

4. ZWARCIE DOZIEMNE W SIECI KOPALNIAŃEJ

4.1. Napięcia, prąd i moc zwarcia doziemnego

W sieci 3 - fazowej symetrycznej z punktem gwiazdowym transformatora połączonym z ziemią przez admitancję Y_0 w warunkach normalnych żyły robocze znajdują się pod napięciem fazowym U_f względem ziemi. Napięcie U_0 punktu gwiazdowego jest równe zero. Przez doziemne upływności G i pojemności C płyną prądy pojemnościowo-upływnościowe. Opory wzdłużne żył kabli i przewodów mogą być pomijane jako nieznaczne w porównaniu z poprzecznymi.

W przypadku doziemienia jednej fazy oporem R_z wyrażenia dla napięcia U_z fazy uszkodzonej względem ziemi oraz prądu I_z i mocy P_z w miejscu zwarcia 1 - biegunowego przyjmują postać

$$U_z = \frac{A}{B} U_f \quad (4.1)$$

$$I_z = \frac{A}{B} \frac{U_f}{R_z} \quad (4.2)$$

$$P_z = \left(\frac{A}{B}\right)^2 \frac{U_f^2}{R_z} \quad (4.3)$$

gdzie

$$\frac{A}{B} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{3} (G_B + G_R) + \sqrt{3} \omega (C_T, C_B) + 2G_0 J^2 +}{(G_R + G_S + G_T + G_0 + G_z)^2 +} + \frac{\sqrt{3} (G_S - G_T) + 3\omega (C_S + C_T) + 2\omega (C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0})^2}{\omega^2 (C_R + C_S + C_T + C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0})^2}} \quad (4.4)$$

oraz

$$\hat{Y}_0 = G_0 + j \left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_0} \right) \quad (4.5)$$

Otrzymane wyrażenia opisują zwarcie doziemne dla przypadku uogólnionego. Stanowią one funkcję 10 zmiennych charakteryzujących stan izolacji oraz częstotliwości i wartości napięcia fazowego. Analiza teoretyczna tych wyrażeń jest praktycznie możliwa przy wykorzystaniu matematycznych maszyn cyfrowych [20].

Dla celów analiz konkretnych sieci, z praktycznym wykorzystaniem ich wyników, możliwe i celowe jest dokonanie pewnych założeń upraszczających. Pozwalają one na otrzymanie zależności funkcyjnych dla napięć, prądów i mocy zwarć z ziemią, przydatnych do stosunkowo łatwych obliczeń i oceny stopnia zagrożenia.

W przypadku gdy można założyć symetrię fazowych pojemności i upływności doziemnych otrzymuje się:

$$U_z = \frac{U_f}{\sqrt{1 + \frac{R^2 + 6 R R_z}{9 R_z^2 (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}}} \quad (4.6)$$

$$I_t = \frac{U_f}{R_z \sqrt{1 + \frac{R R^2 + 6 R R_z}{9 R_z^2 (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}}} \quad (4.7)$$

$$P_z = \frac{U_f^2 R_z}{R_z^2 + \frac{R^2 + 6 R R_z}{9 (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}} \quad (4.8)$$

gdzie R jest wypadkowym oporem izolacji doziemnej jednej fazy sieci a C_n nieskompensowaną doziemną pojemnością fazową.

$$C_n = C - \frac{1}{3 \omega^2 L_0} \quad (4.9)$$

Interesują nas warunki graniczne. Obliczając pierwsze pochodne cząstkowe i przyrównując je do zera stwierdzamy, że dla $R_z = 0$ prąd doziemny przyjmuje wartość największą.

$$I_z \max = 3 U_f \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C_n^2} \quad (4.10)$$

Natomiast największa wartość mocy w miejscu doziemienia wydziela się na oporze R_{zm} , przy czym

$$R_{zm} = \frac{R}{\sqrt{9 (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}} \quad (4.11)$$

$$U_{zm} = U_{om} = \frac{U_f}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 C_n^2 R^2}}}}} \quad (4.12)$$

$$I_{zm} = \frac{3}{\sqrt{2}} U_f \frac{\sqrt{1 + \omega^2 C_n^2 R^2} \sqrt[4]{1 + \omega^2 C_n^2 R^2}}{R \sqrt{1 + \sqrt{1 + \omega^2 C_n^2 R^2}}} \quad (4.13)$$

$$P_{zm} = \frac{3}{2} U_f^2 \frac{1 + \omega^2 C_n^2 R^2}{R (1 + \sqrt{1 + \omega^2 C_n^2 R^2})} \quad (4.14)$$

W przypadku gdy stosowana jest jednocześnie kontrola oporu izolacji R_i prądem stałym i kompensacja pojemności doziemnej C , występuje szeregowo połączenie elementów L_o i R_o lub C_o . Ma to miejsce również w przypadku stosowania przekładników napięciowych w układzie filtra składowych symetrycznych kolejności zerowej.

Wtedy \hat{Y}_o należy zastąpić przez \hat{Y}_k , czyli we wzorze (4.4) należy zastąpić

$$G_o \text{ przez } \frac{R_k}{R_k^2 + (\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k})^2} \quad (4.15)$$

$$C_o - \frac{1}{\omega^2 L_o} \text{ przez } \frac{-L_k + \frac{1}{\omega^2 C_k}}{R_k^2 + (\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k})^2} \quad (4.16)$$

4.2. Stan izolacji sieci

Stan izolacji sieci górniczych jest losową funkcją czasu. Funkcję tę określają przede wszystkim: rodzaj i jakość zastosowanych materiałów izolacyjnych poszczególnych elementów (kable i przewody, osprzęt, aparatura, silniki, transformatory), ich ilość, przekrój i rozciągłość sieci, stopień zawilgocenia i zapylenia, skład chemiczny wód kopalnianych oraz kultura technicznej eksploatacji (badania profilaktyczne, konserwacja, oględziny, montaż, uszkodzenia), okres użytkowania (zmiany połączeń, starzenie cieplne i chemiczne) i warunki geologiczne. Zmiany, analizowane w stanie ustalonym, zachodzą tak w czasie jednej zmiany roboczej, jak w ciągu doby, tygodnia oraz dłuższych okresów czasu. Charakter zmian dla poszczególnych rodzajów urządzeń jest w przybliżeniu taki sam. Decydujący wpływ na stan izolacji układu mają silniki oraz kable i przewody, a przede wszystkim rodzaj i ilość zakończeń i połączeń.

Obserwowane zmiany stanu izolacji można podzielić następująco:

- niesystematyczne, wywołane przyczynami krótkotrwałymi i przypadkowymi,
- systematyczne, powodowane regularnie działającymi czynnikami,

- monotoniczne, występujące w dłuższym okresie czasu w wyniku działania czynników stosunkowo stałych.

Stan izolacji doziemnej odgrywa szczególną rolę w profilaktyce przeciwporażeniowej. Przypadek dotyku, bezpośrednio jednej fazy lub nieuziemionej obudowy znajdującej się pod zabłąkanym napięciem fazowym, w warunkach górniczych można traktować jako jednobiegunowe zwarcie doziemne przez opór R_c ciała człowieka [22, 23].

Przyjmując symetrię zasilania i admitancji doziemnych otrzymuje się

$$U_r = \frac{U_f}{\sqrt{1 + \frac{R(6R_c + R)}{9R_c(1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}}} \quad (4.17)$$

$$I_r = \frac{U_r}{R_c} \quad (4.18)$$

Można wyznaczyć zależność funkcyjną pomiędzy pojemnością i rezystancją izolacji, dla których będzie spełniony wymagany warunek bezpieczeństwa, na przykład dopuszczalnej wartości napięcia U_{zd} lub prądu doziemienia I_{zd} . Przyjmując, że zmienną niezależną jest R , po rozwiązaniu zależności (4.7) i analizie pierwiastków otrzymuje się

$$R = \frac{3R_z(-1 + \sqrt{1 + \alpha/1 - \beta})}{1 - \alpha\beta} \quad (4.19)$$

gdzie:

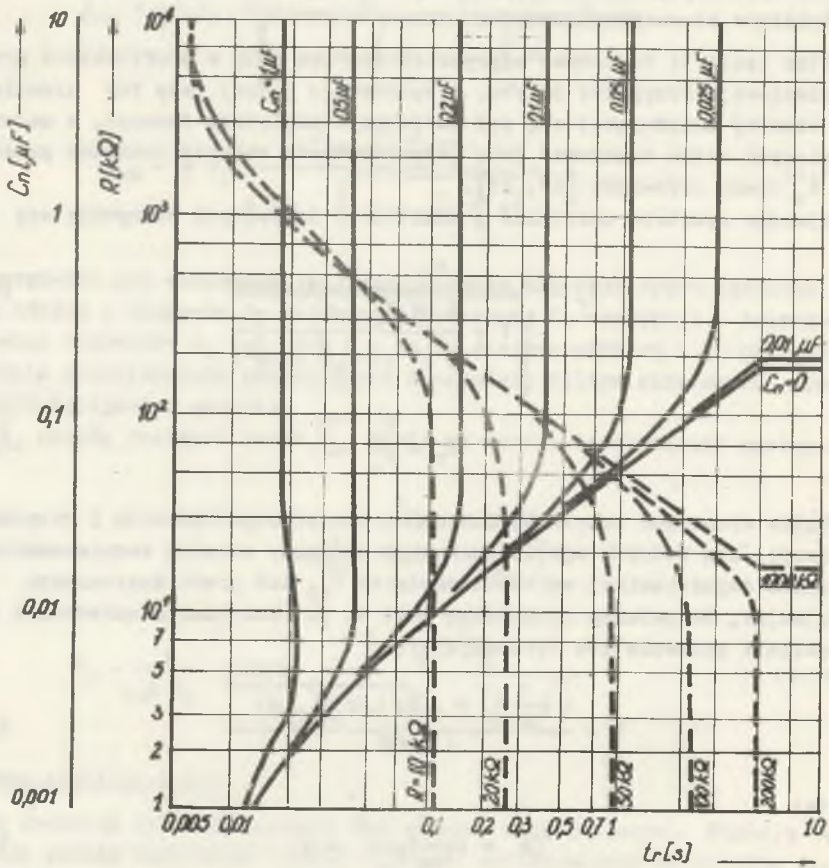
$$\alpha = \left(\frac{U_f}{I_{zd} R_z}\right)^2 - 1 \quad (4.20)$$

$$\beta = 9R_z^2 \omega^2 C_n^2 \quad (4.21)$$

Podobnie wyznaczyć można maksymalną możliwą wartość pojemności doziemnej C_{ng} i odpowiadającą jej wartość rezystancji izolacji R_g . Obliczając granicę wyrażenia (4.19) i dokonując przekształceń otrzymuje się

$$C_{ng} = \frac{1}{\omega R_g} \frac{U_f}{U_{zd}} \quad (4.22)$$

$$R_g = 3R_z \left[\left(\frac{U_f}{I_{zd} R_z}\right)^2 - 1 \right] \quad (4.23)$$



Rys. 3. Dopuszczalne wartości fazowej rezystancji izolacji R i pojemności doziemnej C_n w funkcji czasu rażenia t_r dla sieci 1000 V

————— $R = f(t_r)$, $C_n = \text{constans}$; - - - - $C_n = f(t_r)$, $R = \text{constans}$.

Obliczając pochodną cząstkową zależności (4.6) i (4.7); przyrównując ją do zera i wyznaczając pierwiastki równania kwadratowego, otrzymuje się wzór na wartość rezystancji R_{\min} , przy której napięcie i prąd doziemny mogą być najmniejsze.

$$R_{\min} = \frac{1 + \sqrt{1 + 36R_z^2 \omega^2 C_n^2}}{6 R_z \omega^2 C_n^2} \quad (4.24)$$

Wpływ czasu przepływu prądu na wymagane wartości rezystancji izolacji i pojemności doziemnej ilustruje rysunek 3, na przykładzie sieci 1000 V.

4.3. Uziemienia ochronne

Rozpatrzmy przypadek dodatkowego doziemienia przewodzącej osłony uziemionej, która znalazła się pod napięciem. Opór zastępczy zwarcia z ziemią R_{zz} będzie wypadkowym z oporów uziemienia R_{uz} i doziemienia R_z . Dla $R_{uz} \ll R_z$, po podstawieniu do (4.6) i (4.7) otrzymuje się

$$U_z = U_{uz} = \frac{U_f}{\sqrt{1 + \frac{R}{9(1 + \omega^2 C_n^2 R^2)} \left(\frac{6}{R_{zz}} + \frac{R}{R_{zz}^2} \right)}} \quad (4.25)$$

$$I_z = \frac{U_f}{R_z \sqrt{1 + \frac{R}{9(1 + \omega^2 C_n^2 R^2)} \left[6 \left(\frac{1}{R_{uz}} + \frac{1}{R_z} \right) + R \left(\frac{1}{R_{uz}} + \frac{1}{R_z} \right)^2 \right]}} \quad (4.26)$$

Rozumując analogicznie jak uprzednio możemy wyznaczyć wartości krytyczne (rys. 4).

$$R = \frac{3 R_{zz} (-1 + \sqrt{1 + \alpha(1 - \alpha/\beta_{uz})})}{1 - \alpha/\beta_{uz}} \quad (4.27)$$

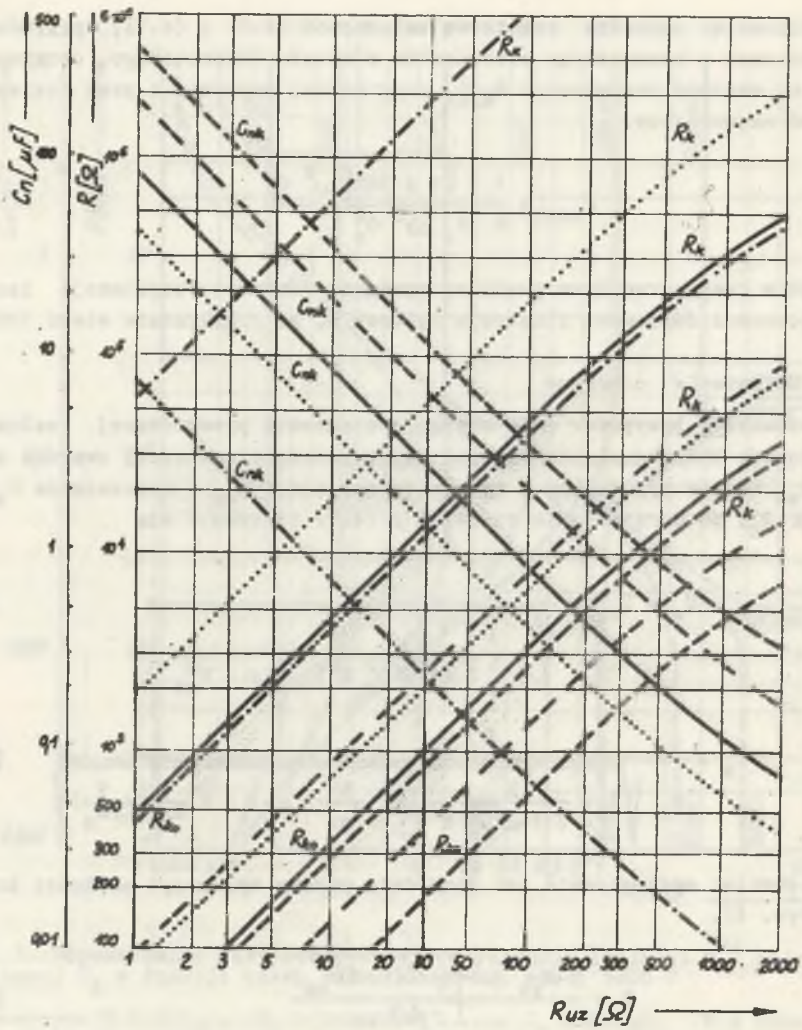
gdzie

$$\beta_{uz} = 9 R_{zz}^2 \omega^2 C_n^2 \quad (4.28)$$

oraz

$$R_{zz} = \frac{R \sqrt{1 + \sqrt{1 + \alpha(1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}}}{3 \alpha (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)} \quad (4.29)$$

$$C_{nk} = \frac{1}{\omega R_k I_{zd} R_z} U_f \quad (4.30)$$



Rys. 4. Krytyczne wartości fazowej rezystancji izolacji R_k i pojemności doziemnej C_{nk} w funkcji oporu uziemienia R_{uz} : $I_{rd} = 10 \text{ mA}$, $R_0 = 2400 \Omega$
 $U_{rd} = 24 \text{ V}$
 ----- 127 V, - - - - 220 V ——— 500 V, 1000 V, - · - · - 6000 V

$$R_k = \frac{3 R_z}{R_z + 1} \alpha \quad (4.31)$$

$$R_{uzk} = \frac{R_z \sqrt{\alpha + 1}}{3 \omega R_z C_n \alpha - \sqrt{\alpha + 1}} \quad (4.32)$$

Dla $C_n = 0$,

$$R_k = R_{ko} = \frac{3 R_z}{R_z + 1} \left(\frac{U_f}{U_{zd}} - 1 \right)$$

W przypadkach gdy system uziemiających przewodów ochronnych, w całej sieci połączonej galwanicznie, wykonany jest za pomocą powłok przewodzących (ekranów) kabli i przewodów, względnie czwartej żyły połączonej z tymi powłokami, opór przejścia uziomów nie ma większego znaczenia. O wartościach napięcia U_z oraz prądu I_z decyduje stan izolacji oraz wypadkowy opór sieci i przewodów ochronnych R_{uz} . Jednak w warunkach eksploatacji górniczej ciągłość sieci ochronnej może ulec przerwaniu, a kontrolowane są tylko niektóre jej odcinki. Niezbędne są dodatkowe uziomy lokalne o odpowiednio małym oporze.

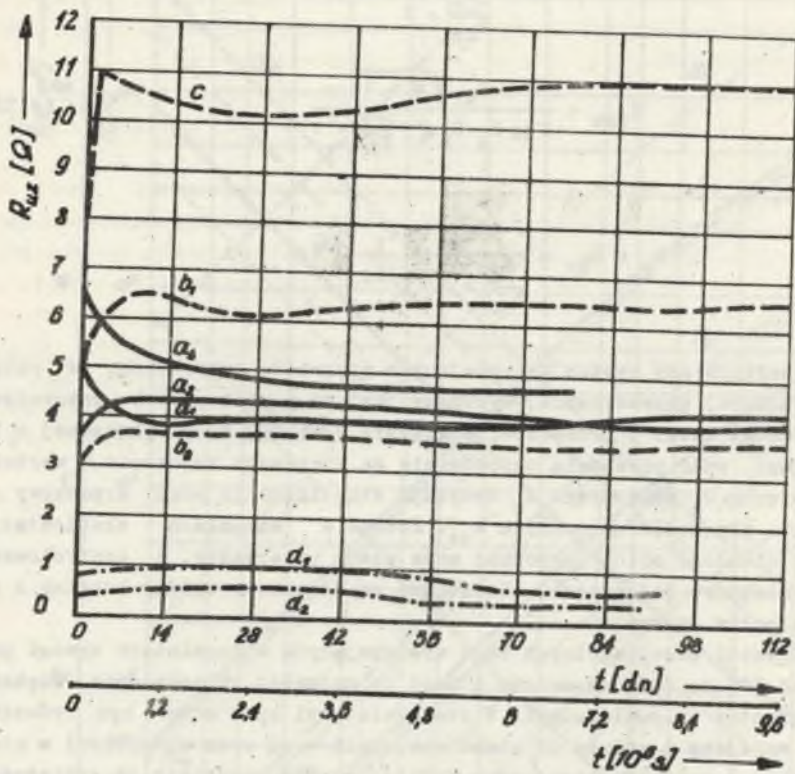
Rezystywność poszczególnych skał występujących w kopalniach wynosi przeciętnie od 100 do 2000 omometrów i jest co najmniej kilkakrotnie większa niż dla gruntów na powierzchni. W rzeczywistości opór może być również znacznie mniejszy i zależy od stanu nasycenia wodą oraz zawartości w niej soli, kwasów i związków zasadowych, a więc przede wszystkim od spoiwości skał. Zakładanie uziomów w skałach spągowych wymaga uprzedniego przygotowania "gruntu" wokół uziomu.

Najczęściej stosowane jest otaczanie uziomu materiałami o mniejszej rezystywności niż gruntu naturalnego, na przykład drobnym koksem, żużlem popiołem lub gliną i zalewanie wodą. Znacznie lepsze wyniki daje nasycenie roztworami soli rozpuszczalnych w wodzie (sól kuchenna, soda, siarczan wapniowy).

Dla oceny skuteczności i przydatności tych sposobów przeprowadzono badania na powierzchni i w podziemiach dwóch krajowych kopalń węgla kamiennego. Badania w podziemiach kopalń przeprowadzono w starych chodnikach na poziomach 400 i 600 m. Wyniki pomiarów podano wykreślnie na rys. 5.

4.4. Wpływ stanu nieustalonego

Stan ustalony zwarcia doziemnego jest poprzedzony rozładowaniem pojemności fazy doziemionej, oraz doładowaniem pojemności pozostałych faz. W miejscu zwarcia prądy te mają ten sam kierunek. Opór doziemienia R_z zwiększa również bezpieczeństwo wybuchowe.



Rys. 5. Opór uziorów w funkcji czasu eksploatacji w podziemiach kopalń
 a_1 - płyta pionowa, żużel i sól a_2 - płyta pozioma, żużel i sól, a_3 - płyta pozioma, popiół i sól, b_1 - rura, sól i solanka, b_2 - rura, żużel z solą i solanka, c - pręt, żużel i solanka, d_1 - płyta w ścieku, d_2 - lina w ścieku

Przewodność izolacji G , "bocznikując" pojemność C oraz iskrzące elektrody może także spełniać pozytywną rolę w procesie wyładowania. Przyczynia się ona do zmniejszenia mocy wyładowania iskrowego i czasu zanikania oraz wartości maksymalnej prądu przejściowego. Jednocześnie jednak powoduje wzrost wartości prądu w stanie ustalonym. Istnieje więc pewna optymalna wartość rezystancji izolacji doziemnej, zależna od wartości napięcia i pojemności doziemnej.

Należy zwrócić uwagę, że iskrowe wyładowanie pojemności sieci odbywa się przy znacznie większym napięciu niż kondensatora o tej samej pojemności. Duże znaczenie posiada indukcyjność obwodu zwarcia doziemnego.

Do jakościowej przybliżonej oceny przebiegów w stanie nieustalonym, a przede wszystkim wpływu wartości rezystancji zwarcia R_z pominiemy wpływ rezystancji R izolacji i przewodów linii oraz założymy doziemienie oporowe na początku linii. Równoważny schemat zastępczy można przedstawić jako włączenie na sinusoidalne napięcie U_f szeregowej gałęzi, z oporem rzeczywistym doziemienia R_z oraz wypadkową indukcyjnością L i pojemnością doziemną C_z .

Prąd nieustalony i_z jest sumą algebraiczną prądu ustalonego i_u oraz prądu przejściowego i_p

$$i_z = i_u + i_p \quad (4.33)$$

$$i_u = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (4.34)$$

gdzie:

$$I_m = \frac{U_m f}{Z} \quad (4.35)$$

$$Z = \sqrt{R_z^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C_z}\right)^2} \quad (4.36)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C_z}}{R_z} \quad (4.37)$$

Prąd przejściowy określimy znajdując całkowitą ogólną równania uproszczonego

$$L \frac{d^2 i_p}{dt^2} + R_z \frac{di_p}{dt} + \frac{1}{C_z} i_p = 0 \quad (4.38)$$

Wprowadzając oznaczenia:

współczynnik tłumienia $\delta = \frac{R_z}{2L} \quad (4.39)$

pulsacja drgań swobodnych $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_z}} \quad (4.40)$

możemy napisać pierwiastki równania charakterystycznego

$$k_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad (4.41)$$

Interesuje nas największa możliwa chwilowa wartość prądu doziemienia I_z . Rozpatrzmy przeto przypadek doziemienia w chwili przejścia ustalonego prądu przez zero: $i_u = 0$, $\psi - \varphi = 0$. Obliczając stałe całkowania dla warunków początkowych $t = 0$, $i_z(0) = 0$, $u_c(0) = 0$, podstawiając je do całek ogólnych równania charakterystycznego oraz analizując otrzymane zależności, otrzymuje się, że dla $\omega < \omega_0$ bezwzględna chwilowa wartość prądu doziemnego i_z może wielokrotnie przewyższyć amplitudę prądu ustalonego. W przypadku "granicznym" ($\delta = \omega_0$) największa wartość aperiodycznego prądu i_p wystąpi w chwili $t = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{\omega_0}$ i równa jest: $I_m \frac{\omega_0}{\omega}$ - zanika praktycznie po kilku milisekundach.

Prąd zaburzeniowy należy więc uwzględniać praktycznie tylko w ocenie niebezpieczeństwa wybuchu. Czas przepływu prądu bezpośrednio decyduje o ilości energii wydzielonej w miejscu i w obwodzie zwarcia. Przez skrócenie czasu zwarcia można ograniczyć niebezpieczeństwo porażień i pożarów oraz częściowo wybuchów. Przede wszystkim uzyskuje się zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia jednocześnie: uszkodzenia izolacji i sprzyjających warunków.

Czas doziemienia wpływa bezpośrednio na wytrzymałość układów elektroizolacyjnych. W stanie ustalonym podwyższenie napięcia faz nieuszkodzonych względem ziemi nie przekracza 80%.

W stanach nieustalonych mogą występować przepięcia o bardzo dużej wartości. Są one przyczyną uszkodzeń linii, transformatorów i innych urządzeń elektrycznych w sieci połączonej galwanicznie. Przepięcia te szczególnie w przypadkach nie wyłączenia zwarcia powodują wzrost jonizacji przede wszystkim w układach izolacyjnych uwarstwionych z powietrzem. Przepięcia te są groźne szczególnie w podziemiach kopalń z uwagi na specyficzne warunki mikroklimatu kopalnianego wpływającego na pracę materiałów izolacyjnych [26]. Najgroźniejsze w skutkach są przepięcia wywołane przerywaniem łuku zwarciovego. Kompensacja pojemności nie usuwa zupełnie przepięć, lecz obniża ich krotność. Jednocześnie jednak zwiększa się prawdopodobieństwo łuku przerywanego, oraz przepięć rezonansowych.

5. WŁAŚCIWOŚCI KABLI I PRZEWODÓW GÓRNICZYCH

5.1. Wpływ temperatury

Z analizy i porównania wartości liczbowych wynika, że dla kabli i przewodów stosowanych w podziemiach kopalń wpływ naskórkowości i zbliżenia żył, jak również strat w powłokach przewodzących, w uzbrojeniu i w dielektryku, można pominąć bez szkody dla obliczeń praktycznych. Wtedy ener-

gia strat ciepłych w przewodzie wielożyłowym może być wyrażona wyłącznie stratami czynnymi w żyłach roboczych.

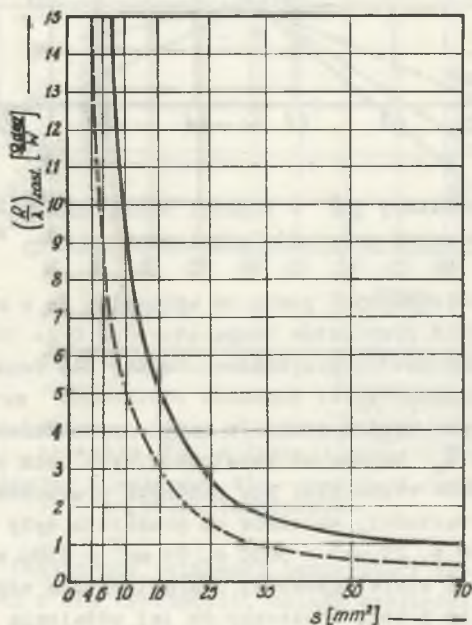
Największą wartość ustalonego przyrostu temperatury $\Delta\vartheta$, jaki osiągnie przewód wielożyłowy przy długotrwałym symetrycznym obciążeniu I żył roboczych o oporze $R_{\frac{1}{2}}$ można wyrazić

$$\Delta\vartheta_{\text{maks}} \approx I^2 \left(\frac{R_{\frac{1}{2}}}{\lambda}\right)_{\text{zast.}} \quad (5.1)$$

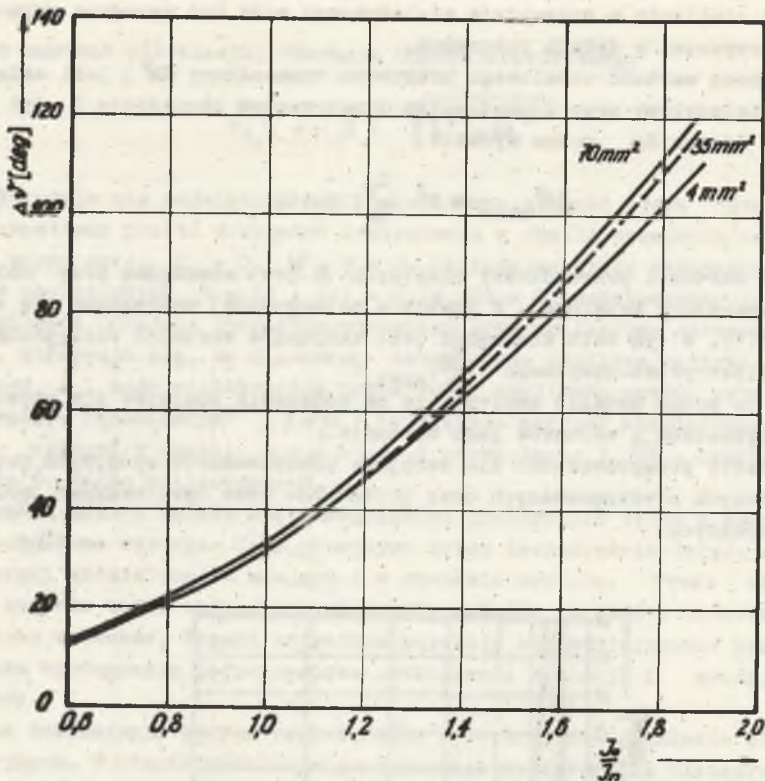
Znajomość wartości przewodności ciepłych λ jest niezbędna przy obliczeniach temperatury ustalonej. W praktyce najwygodniej posługiwać się zależnością (5.1). W tym celu niezbędna jest znajomość wartości zastępczego oporu "elektryczno-cieplnego" $\left(\frac{R_{\frac{1}{2}}}{\lambda}\right)_{\text{zast.}}$.

Wartości te można ustalić empirycznie na podstawie pomiarów dla określonego typu przewodów i warunków jego ułożenia.

Pomiary takie przeprowadzono dla seryjnie produkowanych oponowych przewodów górniczych nieekranowanych oraz prototypów nowo opracowanych przewodów ekranowanych.



Rys. 6. Zastępczy opór elektryczno-ciepły $\frac{R}{\lambda}$ oponowych przewodów górniczych 1 kV w funkcji przekroju s żyły roboczej; — "na żyły roboczej"; - - - "na oponie"



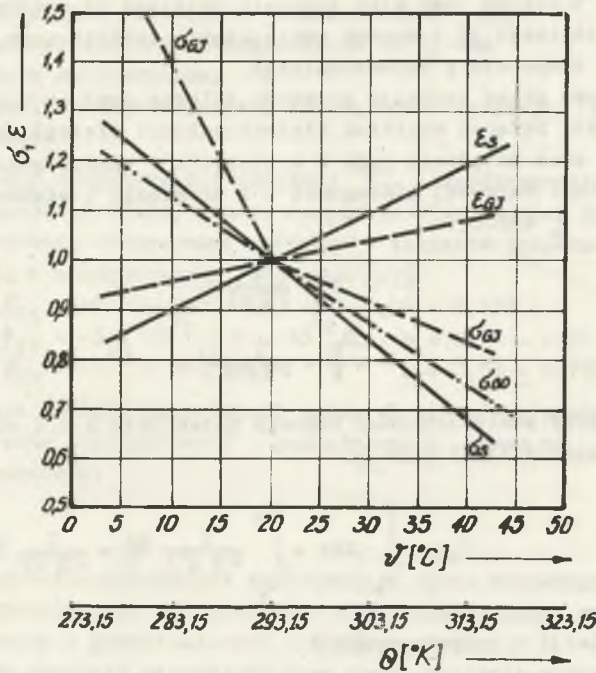
Rys. 7. Przyrost temperatury Δv w funkcji obciążenia $\frac{I_0}{I_n}$ i przekroju żył roboczych przewodów górniczych

Analiza wyników wielokrotnych pomiarów wykazała, że w zakresie mierzonych wartości ustalonych przyrostów temperatury od 0 do 90°C zastępczy opór elektryczno-ciepłny jest w przybliżeniu stały dla danego rodzaju kabla lub przewodu oponowego. Wyniki pomiarów oszacowano metodą najmniejszych kwadratów. Wybrane wyniki pomiarów podano przykładowo na rys. 6 i 7. Ciepła stała czasowa τ_c zależy od konstrukcyjnych cech przewodu, sposobu jego ułożenia i warunków otoczenia. Dla badanych przewodów oponowych otrzymano następujące wartości, zależnie od przekroju żyły roboczej: 4 mm² - 2280s, 16 mm² - 2700 s, 25 mm² - 3000 s, 35 mm² - 3300 s, 50 mm² - 3720 s, 70 mm² - 4200 s. Wartość stałej czasowej charakteryzuje szybkość narastania temperatury, a więc i czas konieczny do jej ustalenia się. W praktycznych przypadkach budowy i stosowania przewodów górniczych przebieg nagrzewania odbiega od eksponentyjnego. Wynika to ze zmienności stałej czasowej przede wszystkim w pierwszym okresie nagrzewania ($t \leq \tau_c$).

Właściwości elektryczne i mechaniczne materiałów organicznych stosowanych w kablach i przewodach zmieniają się z czasem w wyniku tzw. starzenia. Przyczyną starzenia są głównie: temperatura, tlen, ozon, powietrze,

promienie świetlne oraz ulatnianie się plastyfikatora. Dlatego też stosowanie powłok "zewnętrznych" może zmniejszyć starzenie izolacji więcej niż dwukrotnie. Przy długotrwałym działaniu podwyższonej temperatury fizyko-mechaniczne właściwości zmieniają się nieodwracalnie. Przy krótkotrwałym działaniu zmieniają się tylko fizyczne właściwości, a zmiany te nie są trwałe. Po ochłodzeniu do temperatury początkowej następuje powrót do wyjściowych wartości właściwości fizycznych.

Przykład zmian odwracalnych, wytrzymałości σ oraz wydłużenia przy zerwaniu ϵ tworzyw termoplastycznych i gum w zależności od temperatury pomiaru, podano na rys. 8.



Rys. 8. Względna zmiana wytrzymałości na rozciąganie σ i wydłużenia przy zerwaniu ϵ w funkcji temperatury T

S - polwinyl izolacyjny i oponowy, GI - guma izolacyjna, GO - guma oponowa polichloroprenowa

W obliczeniach faktycznie osiągniętej temperatury kabli i przewodów górniczych i związanej z nią żywotności, należy uwzględnić możliwość jej zwiększenia się ponad wartość dopuszczalną w wyniku okresowych przeciążeń powodowanych częstymi i ciężkimi rozruchami dużych silników klatkowych. Stosowane w podziemiach kopalń bezpiecznych pod względem wybuchowym zabezpieczenie ich bezpiecznikami topikowymi, pozwala na przeciążanie kabli i przewodów od 10 do 45% przez okres czasu od 1 do 3 godzin. Możliwe wartości czasów przeciążenia przekraczają wartości cieplnych stałych czasowych,

może więc nastąpić nawet ustalenie się temperatury o wartości znacznie większej (rys. 7) niż dopuszczalna. Przeprowadzone pomiary na przewodach OG i kablach AKSFt wykazały, że praktycznie przyrost temperatury w takich przypadkach może wynosić nawet 50-100 deg.

W ocenie trwałości przewodów oponowych należy uwzględnić również wzrost temperatury w wyniku zwijania ich w kręgi. Decydującym czynnikiem nie jest jednak starzenie cieplne izolacji, lecz przede wszystkim uszkodzenia mechaniczne, które zmuszają do wycofywania przewodów z ruchu, mimo że właściwości fizyko-mechaniczne i elektryczne izolacji spełniają jeszcze wymagania normatywne.

Rzeczywista trwałość jest więc znacznie mniejsza od wynikającej z warunku starzenia cieplnego (2,5-krotne zmniejszanie trwałości na każde 10 deg ponad wartość temperatury dopuszczalnej).

Prąd upływu przez izolację przewodu zależy od wartości napięcia i przewodności będącej wynikiem niedoskonałości dielektryka. Gęstość J prądu upływu I oraz natężenie pola K w izolacji o konduktywności γ - w dowolnej powierzchni walcowej o długości l i promieniu x większym od promienia przewodnika r_w wynosi:

$$J = \frac{I}{2\pi x l} \quad (5.2)$$

$$K = \frac{H}{\gamma} = \frac{I}{2\pi \delta x l} \quad (5.3)$$

Napięcie między powierzchniami równego potencjału A i C obliczymy jako całkę liniową wzdłuż linii pola

$$U_{AC} = \int_{r_w}^{r_z} K dx = \int_{r_w}^{r_z} \frac{I}{2\pi \delta l} \frac{dx}{x} = \frac{I}{2\pi l \delta} \ln \frac{r_z}{r_w} \quad (5.4)$$

Opór R_i izolacji o rezystywności ρ

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_z}{r_w} \quad (5.5)$$

W przypadku izolacji warstwowej przewodu ekranowanego złożonej z n różnych dielektryków zależność dla oporu izolacji przyjmuje postać:

$$R_i = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{r_1}{r_w} + \frac{\rho_2}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{\rho_n}{2\pi l} \ln \frac{r_z}{r_{n-1}} \quad (5.6)$$

Obliczanie oporu izolacji kabli i przewodów wielożyłowych nie ekranowanych jest bardziej skomplikowane i pracochłonne, zależnie od budowy, liczn-

by i układu żył oraz układu izolacyjnego. Można wykorzystać w tym celu analogię pomiędzy polem elektrycznym prądu stałego w ośrodku przewodzącym a polem elektrostatycznym w dielektryku.

Opór izolacji kabli i przewodów górniczych maleje ze wzrostem temperatury

$$R_i \approx 3,67 \cdot 10^{-10} \int_{20}^t e^{-b(t-20)} \log \frac{r}{r_w} \quad (5.7)$$

gdzie

- R_i - jednostkowy opór izolacji w temperaturze t , $\Omega \text{ km}$
- \int_{20} - opór właściwy skrośny w temperaturze 20°C , $\Omega \text{ m}$
- t - temperatura obliczeniowa, $^\circ\text{C}$
- b - współczynnik charakteryzujący zmianę oporu izolacji ze zmianą temperatury.

Rzeczywiste wartości rezystywności skrośnej \int_{20} i współczynnika b dla danego rodzaju izolacji są różne, przede wszystkim w zależności od kraju i producenta. Praktycznie otrzymywane wartości w zakresie temperatur roboczych mieszczą się w następujących granicach [27]

- guma izolacyjna: $\int_{20} = 10^{10} - 10^{13} \Omega \text{ m}$, $b = 0,06 - 0,138$
- polwinit: $\int_{20} = 5 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{12} \Omega \text{ m}$, $b = 0,13 - 0,20$
- papier nasycony: $\int_{20} = 10^{13} - 10^{15} \Omega \text{ m}$, $b = 0,06 - 0,113$

Pomiary wykonane zostały na próbkach gotowych wyrobów w postaci odcinków kabli i przewodów wielożyłowych i jednożyłowych - oraz na odcinkach żył wyjętych z przewodów.

5.2. Wpływ wilgoci

W wyniku zawilgocenia następuje: zmniejszenie oporu skrośnego i powierzchniowego, zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej oraz zwiększenie strat dielektrycznych i przenikalności dielektrycznej.

Praktycznie należy wyróżnić zasadnicze trzy drogi wnikania wody:

- niewłaściwie wykonane zakończenia lub połączenia żył,
- nieodpowiednio dobrane i wykonane powłoki,
- uszkodzenia mechaniczne, elektryczne i korozyjne powłok zewnętrznych.

Proces dyfuzji przez materiał higroskopijny opisany jest podstawowymi równaniami Ficka [4,34]:

$$dN = DS \frac{dD}{dx} dt \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = \frac{D}{h} \frac{\partial^2 N_0}{\partial x^2} \quad (5.9)$$

w których

ΔX - ilość wody, przechodzącej przez warstwę dx materiału o powierzchni S w czasie dt przy różnicy ciśnień dp ,

D - współczynnik dyfuzji, charakteryzujący proces przechodzenia pary wodnej przez materiał o powierzchni $S = 1 \text{ m}^2$ i grubości $x = 1 \text{ m}$ przy różnicy ciśnień 1 N/m^2 w ciągu 1 s w określonej temperaturze, $\text{kg}\cdot\text{m/N}\cdot\text{s}$

$\frac{D}{h}$ - współczynnik intensywności dyfuzji, m^2/s .

W tym samym okresie czasu może wniknąć do izolacji przewodu różna ilość wody - zależnie od zastosowanych materiałów oraz wilgotności środowiska i temperatury. Jednocześnie ta sama ilość wchłoniętej wody może powodować inne zmiany podstawowych własności przewodu. Dlatego też określenie dopuszczalnego zawilgocenia izolacji powinno być wynikiem badań eksperymentalnych dla danej konstrukcji i przeznaczenia przewodów. Zazwyczaj jako kryterium dopuszczalnego zawilgocenia przewodów elektroenergetycznych, dla określenia czasu ich poprawnej pracy, przyjmowana jest wytrzymałość elektryczna izolacji. Kryterium to charakteryzuje jednak tylko miejscowe pogorszenie izolacji, na przykład w wyniku mechanicznego uszkodzenia powłok. Natomiast w przypadku ogólnego zawilgocenia opór izolacji ulegnie bardzo dużemu zmniejszeniu, a mimo to jej wytrzymałość dielektryczna może być dostateczną.

Badania wpływu długotrwałego (1 rok) zanurzenia w wodzie przewodów opornych i półgiętkich oraz kabli w polwinicie wykazały dostateczną ich odporność. W przypadku powłok nieuszkodzonych zmniejszenie rezystancji izolacji wynosiło 10-25%. W przypadku cyklicznego obciążenia przewodów i kabli z uszkodzoną powłoką zewnętrzną nastąpiło zmniejszenie rezystancji do 0,3 wartości początkowej.

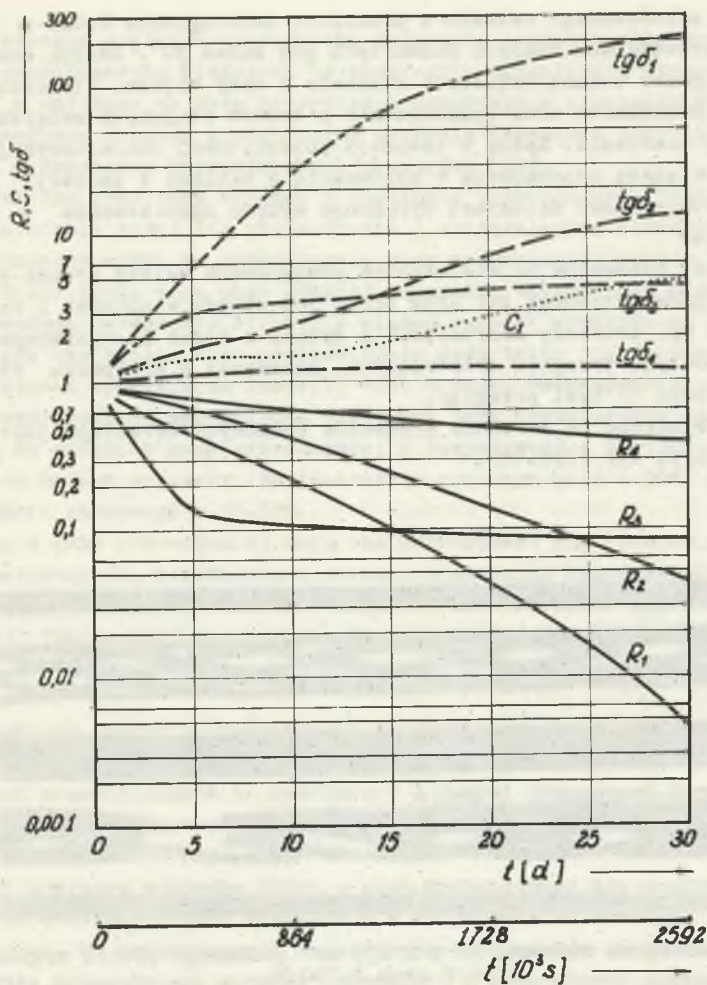
Badano również wnikanie wilgoci przez zakończenia kabli i przewodów. Stwierdzono, że dla kabli i przewodów o izolacji polwinitowej i gumowej możliwe jest stosowanie muf i głowic bez konieczności ich zalewania. Ograniczenie dostępu wilgoci do izolacji oraz ochrona przed gromadzeniem się na niej rosy i pyłu węglowego możliwe jest przez zastosowanie hydrofobowanego piasku kwarcowego [25]. Dla kabli o izolacji papierowej należy dodatkowo "uszczelnić" izolację żył.

Wybrane wyniki badań, niektórych rodzajów uszczelnień w postaci obwojów, przedstawiono wykreślnie na rys. 9.

5.3. Wpływ rodzaju budowy

Wstępną ocenę rodzaju budowy przewodów umożliwiają przeprowadzone badania odporności na uderzenia i wielokrotne przeginania. Badane przewody znajdowały się pod napięciem 127 i 500 V.

Kontrolowano stan izolacji oraz ciągłość żył. W próbach odporności na uderzenia i przecinanie uszkodzenia powodowano w wyniku spadania bijaka



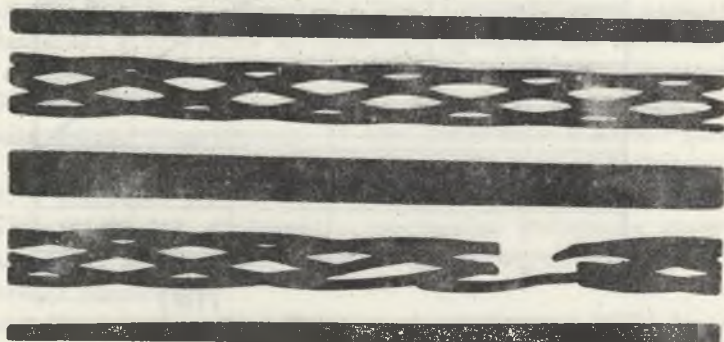
Rys. 9. Względna zmiana stanu izolacji doziemnej - rezystancji R, pojemności C i stratności dielektrycznej $tg\delta$ - zakończeń kabli AKSft wykonanych w postaci obwojów z:

1 - elektroizolacyjnej taśmy olejnej, 2 - taśmy z tkaniny szklanej nasyconej żywicą epoksydową, 3 - taśmy z tkaniny szklanej nasyconej żywicą epoksydową i powleczonych pastą silikonową, 4 - taśmy teflonowej

stalowego zakończony ostrzem o promieniu zaokrąglenia 0,025 m oraz ostrzem o krawędziach tnących rozwartych pod kątem 30° . Zmianę energii uzyskiwano przez zmianę wysokości spadania i masy bijaka. Stwierdzono, że centralna przekładka oraz opancerzenie z drutów stalowych zwiększają odporność na uderzenia. Kable o izolacji polwinitowej charakteryzują się wielokrotnie większą odpornością w porównaniu z kablami o izolacji papierowej. Nie stwierdzono natomiast wyraźnego wpływu opancerzenia w próbach przecinania.

Odporność przewodów na wielokrotne przeginanie zależy przede wszystkim od układu geometrycznego żył oraz skoku ich skrętu w ośrodek i rodzaju linki. I tak np. przewody wiertarkowe z żyłami z linek L4 wytrzymały więcej niż 100 tys. przegięć dwustronnych, natomiast w przypadku stosowania linek L3 około 40 tys. przegięć.

Także wytrzymałość na zerwanie przewodów oponowych określona jest głównie wytrzymałością żył (rys.10).



Rys. 10. Radiogram przewodu OG 5 x 2,5 mm² poddanego próbie zrywania siłą 1700 N oraz 2,700 N

Ograniczenie niebezpiecznych skutków uszkodzeń kabli i przewodów można uzyskać w wyniku zastosowania ekranowania żył i ośrodka. Zwiększenie bezpieczeństwa rażeniowego, pożarowego i wybuchowego, w porównaniu z przewodami nieekranowanymi, wynika z możliwości stosowania w szerszym zakresie profilaktyki eksploatacyjnej. Urządzenia kontroli stanu izolacji i zabezpieczenia ziemnozwarciowe mogą działać bardziej efektywnie - w początkowym stadium rozwoju uszkodzenia. Można uzyskać skuteczne ograniczenie energii wydzielającej się w miejscu uszkodzenia jednofazowego oraz zmniejszenie czasu trwania zagrożenia i prawdopodobieństwa występowania zwarć międzyfazowych.

W przewodach giętkich stosuje się wyłącznie ekrany z plastycznych mieszanek przewodzących. Mieszanki te skutecznie ograniczają wtrącenia powietrza, a nałożone na żyły przewodzące zapobiegają starzeniu się izolacji pod wpływem tlenków miedzi, oraz stanowią dodatkową ochronę cieplną izolacji w przypadku krótkotrwałych przetężeń [28].

Zasadniczym problemem ekranów z mieszanek przewodzących jest zapewnienie dostatecznie dużej ich przewodności i obciążalności elektrycznej.

Niekorzystny wpływ na konduktancję gumy przewodzącej oprócz temperatury i gęstości prądu mogą mieć również działania takich sił mechanicznych które powodują naruszenie struktury wiązań cząstek wypełniacza przewodzącego. Wpływ ten będzie więc odpowiednio duży tylko dla mieszanek o małej zawartości wypełniacza (sadzy), tzn. o dużej rezystywności - przyjmując, że wytrzymałość mechaniczna mieszanki jest dostatecznie duża. Pomiarów wykonanych na próbkach gumy przewodzącej o rezystywności $0,45 \Omega \text{m}$, pobranej z przewodu OnGekn wykazały, że 10-krotnie rozciągnięcie o 50% powodowało wzrost oporu skrośnego o 10-30%.

Wyroby z gumy przewodzącej mogą charakteryzować się również anizotropowością rezystancji, powstającą w trakcie produkcji. Przewodność w kierunku nakładania może być dwukrotnie większa niż w kierunku poprzecznym do orientacji "łańcuchów" przewodzących. Anizotropia ta praktycznie może być pomijana w przypadku mieszanek plastycznych o rezystywności mniejszej od $1 \Omega \text{m}$.

Wymagania w zakresie przewodności elektrycznej i obciążalności prądowej ekranów ochronnych związane są ściśle z budową i zasadą działania zabezpieczeń przewidzianych do współpracy z danymi przewodami. Decydują przede wszystkim: droga, wartość i czas przepływu prądów zwarciovych lub kontrolnych oraz wartość napięcia.

Ekranu ochronne wykonane tylko z gumy przewodzącej nie mogłyby spełnić wymagań im stawianych przy współpracy z dotychczas stosowanymi układami zabezpieczeń. We współczesnych konstrukcjach przewodów ekranowanych dla zwiększenia przewodności ekranów ochronnych i kontrolnych powszechnie stosowane są dodatkowe przewodniki metalowe, tak zwany "drenaż" gumy przewodzącej. Głównym ich zadaniem jest zapewnienie dostatecznej przewodności podłużnej ekranów.

W przypadku przewodów przewidzianych do współpracy z urządzeniami do ciągłej kontroli stanu izolacji w sieciach izolowanych, dla zwiększenia przewodności podłużnej, najchętniej obecnie wykorzystywane są nieizolowane żyły ochronne (uziemiające). Sposób taki obecnie stosowany jest we wszystkich opracowywanych konstrukcjach krajowych przewodów ekranowanych.

O skuteczności stosowania ekranów ochronnych decyduje przede wszystkim opór przejścia od ekranowanych żył do części metalowej ekranu, na przykład żyły ochronne - czyli tzw. przewodność poprzeczna. Wartość tej przewodności przy określonej rezystywności gumy przewodzącej, zależy głównie o konstrukcji i jakości wykonania przewodu.

Wypadkowa przewodność ekranów w sieciach niskiego napięcia powinna być taka, aby następowało niezawodne zadziałanie urządzeń kontrolnych w każdym przypadku niebezpiecznego uszkodzenia izolacji, choćby jednej fazy. Należy więc założyć, że zadziałanie zabezpieczeń powinno nastąpić również w przypadku przekłucia izolacji i ekranu indywidualnego żyły, na przykład złamanym drutem żyły lub ekranu od wewnątrz lub drutem strzałowym z zewnątrz przewodu.

Wymagana przewodność powinna wynikać z czułości działania zabezpieczenia dla tego rodzaju uszkodzeń, ponieważ w innych możliwych praktycznie uszkodzeniach warunki działania zabezpieczeń są lepsze. Dlatego ocena skuteczności ochronnego działania ekranów, powinna być wykonywana eksperymentalnie na próbkach odcinków fabrykacyjnych przewodów ekranowanych.

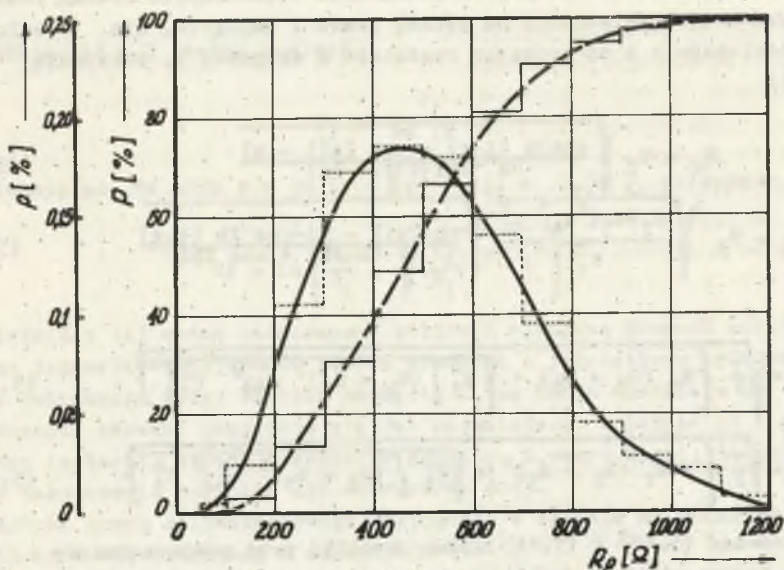
Badania skuteczności ekranów ochronnych przeprowadzano przez nakłuwanie igłą stalową. Igła powinna być stosunkowo cienka, dobrana i osadzona tak, aby po nakłuciu zwierała tylko jedną żyłę roboczą z ekranem. Pomiar przewodności ekranów przeprowadza się pomiędzy ekranem (np. żyłą ochronną) a żyłą roboczą badanego odcinka przewodu. Konieczna jest więc kontrola trafienia w poszczególne żyły robocze. Jednym z zadań ochronnych ekranów indywidualnych jest zapobieganie zwarciom wewnętrznym międzyfazowym. W przypadku ekranów ogólnych, wykonanych na przykład w postaci wspólnej powłoki przewodzącej i przekładki centralnej, należy sprawdzić również przewodność tej ostatniej.

Wyniki pomiarów rezystancji przejścia R_p ekranów, przeprowadzonych na próbkach prototypowych odcinków opracowanych ostatnio ekranowanych przewodów górniczych, zawierają się [29] w granicach od 0,1 do 250 k Ω . Średnia wartość rezystywności gumy przewodzącej, zmierzona zgodnie z obowiązującą normą na próbkach wyjętych z badanych przewodów wynosi od 0,21 do 2,48 ometa.

Szczegółowe pomiary rezystancji przejścia ekranów przeprowadzano dla prototypu przewodu oponowego OnGekn $3 \times 50 \text{ mm}^2 + 35 \text{ mm}^2 + 4 \times 2,5 \text{ mm}^2$, 1000 V. Procentowy rozkład prawdopodobieństwa wypadkowego oporu przejścia ekranów ochronnych trzech żył tego przewodu podano na rys. 11. Przedstawia on w postaci graficznej skumulowany histogram częstości oraz rozkład gęstości i dystrybuantę empiryczną. Wartość modalna rozkładu jest równa jego medianie i wynosi 460 omów.

Indywidualne ekrany ochronne ograniczają możliwość powstawania zwarć międzyfazowych wewnątrz kabli i przewodów. Dotyczy to także przypadków uszkodzeń w wyniku zgniatania przewodu maszynami górniczymi lub spadającą skałą. Prawdopodobieństwo, że ewentualne zwarcie żył roboczych poprzedzone zostanie uszkodzeniem izolacji jednej żyły i zwarciem doziemnym (do ekranu), może być względnie duże. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych badań.

Stopień ochronnego działania ekranów oceniano na podstawie wartości współczynnika k_{uo} . Wyraża on stosunek liczby uderzeń powodujących zwarcie żyły



Rys. 11. Empiryczny rozkład gęstości i dystrybuanta rezystancji przjęcia ekranów ochronnych w przewodach OnGekn 3 x 50 mm² + 25 mm² + 4x2,5 mm², 1kV

roboczej (ewentualnie pomocniczej) z ekranem ochronnym i liczby uderzeń niezbędnych do wywołania zwarcia międzyfazowego. Średnia wartość współczynnika zawiera się w granicach od 0,5 do 0,8, zależnie od budowy przewodu.

5.4. Wpływ rozkładu pola w zakończeniach przewodów

Napięcie przeskoku po powierzchni izolacji jest zawsze co najmniej kilkakrotnie mniejsze od jej wytrzymałości skrośnej. Szczególnie więc ważnym zagadnieniem jest uzyskanie odpowiedniego, korzystnego rozkładu pola elektrycznego w zakończeniu przewodu. W warunkach eksploatacji podziemnej nie zawsze można zapewnić dostatecznie duże odległości, zapobiegające przeskokom powierzchniowym, podobnie jak to jest stosowane w urządzeniach budowy otwartej.

Dla właściwej oceny wpływu długości l zakończenia i rezystancji jednostkowej ekranów R_1 , należy przeprowadzić analizę rozkładu prądu powierzchniowego i napięcia względem ziemi. Wykonamy ją na przykładzie ekranowanej żyły przewodu OnGbekł/w, 6 kV.

Traktując zakończenie jako elektryczny obwód jednorodny, można przyjąć schemat zastępczy (jednej żyły), złożony z szeregowo połączonych elementów długości dx . Opory warstwy przewodzącej na izolacji $R_1 dx$ połączone są szeregowo, a w punktach wspólnych dwu sąsiednich oporów są włączone gałęzie równoległe zastępujące izolację o przewodności $G_3 dx$ i pojemności $C_1 dx$ oraz opór ekranu wyrównawczego na żyłę $R_2 dx$.

Po ułożeniu, rozwiązaniu i przekształceniu odpowiednich równań różniczkowych cząstkowych zależności na zmianę prądu i napięcia, dla dowolnego punktu oddalonego o x od początku rozdziału o długości l , przyjmują postać [30]:

$$U_x = U_f \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2a(1-x) + \cos 2a(1-x)}{\operatorname{ch} 2a + \cos 2a}} \quad (5.10)$$

$$I_x = U_f \sqrt{\frac{G_2 + G_3 (\omega^2 C_1^2)}{R_1^2}} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2a(1-x) - \cos 2a(1-x)}{\operatorname{ch} 2a + \cos 2a}} \quad (5.11)$$

gdzie:

$$a = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ R_1 (G_2 + G_3) + \sqrt{R_1^2 [(G_2 + G_3)^2 + \omega^2 C_1^2]} \right\}} \quad (5.12)$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ -R_1 (G_2 + G_3)^2 + \sqrt{R_1^2 [(G_2 + G_3)^2 + \omega^2 C_1^2]} \right\}} \quad (5.13)$$

Z układu równań (5.10) i (5.11) można określić prąd powierzchniowy i potencjał w każdym punkcie zakończenia, znając jego długość l oraz wartości jednostkowe parametrów: R_1, R_2, R_3, C_1 . W praktycznych obliczeniach zakończeń przewodów średnich napięć można pominąć upływność izolacji oraz opór ekranu wyrównawczego, jako nieznaczne w porównaniu z pozostałymi. W takim przypadku otrzymuje się

$$\hat{\gamma} = a + jb = \sqrt{j \omega R_1 C_1} = (1 + j) \sqrt{f R_1 C_1} = (1 + j)d$$

$$U_x = U_f \sqrt{\frac{\operatorname{sh}^2 (1-x)d + \cos^2 (1-x)d}{\operatorname{sh}^2 ld + \cos^2 ld}} \quad (5.14)$$

$$I_x = \sqrt{2} \frac{d}{R_1} U_f \sqrt{\frac{\operatorname{sh}^2 (1-x)d + \sin^2 (1-x)d}{\operatorname{sh}^2 ld + \cos^2 ld}} \quad (5.15)$$

gdzie:

$$d = \sqrt{f R_1 C_1} \quad (5.16)$$

Przeskok powierzchniowy nie wystąpi jeżeli różnica potencjałów między żyłą a ekranem będzie odpowiednio mała. Wystarczająco małą różnicę potencjałów w punkcie $x = 1$ można otrzymać dobierając stosunkowo dużą wartość iloczynu ld .

Napięcie w punkcie $x = 1$, obliczamy z równania (5.14)

$$U_1 = \frac{U_f}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 ld + \cos^2 ld}} \quad (5.17)$$

Zakładając $ld \gg 3$ można napisać

$$U_1 \approx \frac{U_f}{\text{sh } ld} \quad (5.18)$$

Uwzględniając, że $\text{arsh } y = \ln(y + \sqrt{y^2 + 1})$, a $U_f \gg U_1$ otrzymuje się

$$ld = \ln \left\{ \frac{U_f}{U_1} + \sqrt{\left(\frac{U_f}{U_1}\right)^2 + 1} \right\} \quad (5.19)$$

Z zależności tej można każdorazowo obliczyć wymaganą długość zakończenia, znając jednostkową pojemność fazową przewodu i jednostkowy opór czynny ekranu ochronnego żyły. Wartość napięcia U_1 na końcu rozdziału (w miejscu zakończenia ekranu) przyjmuje się jak najmniejszą, zależnie od grubości warstwy izolacji, ekranu i wymiarów głowicy. Z wzoru widać, że opór ekranów w zakończeniu powinien być stosunkowo duży.

Wartość prądu upływnościowego, płynącego w ekranie na początku zakończenia ($x = 0$), obliczamy w zależności (5.15)

$$I_0 \approx U_f \sqrt{\frac{\omega C_1}{R_1}} \quad (5.20)$$

Wartość tego prądu jest szczególnie istotna przy stosowaniu ekranów z gumy przewodzącej, z uwagi na jej małą dopuszczalną obciążalność cieplną. Zakończenia (złącza) wykonane z uwzględnieniem wniosków wynikających z powyższych wyprowadzeń mogą być wykonywane w obudowie o małych wymiarach, np w postaci wtykowej, ułatwiając eksploatację z zachowaniem wymagań bezpieczeństwa i pewności ruchu. W praktycznych warunkach, stosowania przewodów ekranowanych średnich napięć o pojemności fazowej około $0,5 \mu\text{F/km}$ oraz długości zakończeń 10-20 cm, opór właściwy materiału ekranu wyrównawczego powinien wynosić 10^3 - $10^6 \Omega\text{m}$.

5.5. Wpływ geometrycznego układu żył

Prądy płynące żyłami roboczymi wytwarzają pole elektromagnetyczne, w wyniku którego w żyłach sterowniczych i ochronnej mogą pojawiać się dodatkowe napięcia.

Z uwagi na małe odległości i asymetryczne ułożenie żył w kablach i przewodach górniczych napięcia te mogą osiągać znaczne wartości ustalone w przypadku zasilania odległych i dużych maszyn, bądź przejściowe, w przypadku rozruchu silnika asynchronicznego zwartego, pracy jednofazowej lub zwarcia w sieci, szczególnie oporowego zwarcia dwufazowego. Napięcia te mogą powodować przepływ dodatkowych prądów w obwodach sterowania, kontroli i ochrony, a więc wpływać na pewność ich działania i ogólny stopień bezpieczeństwa elektryfikacji.

Zagadnienia te nabierają specyficznego znaczenia w kopalniach gazowych, w których do sterowania wymagane są skomplikowane układy z obwodami iskro-
bezpiecznymi, a ewentualne iskrzenie w obwodzie żyła uziemiająca - spąg,
może być bardzo groźne.

Rozpatrzmy dwa statyczne obwody linearne a i b. Jeżeli w obwodzie a płynie prąd zmienny i_a , to w obwodzie b powstaje siła elektromotoryczna indukcji, rozumiana jako spadek napięcia w całym zamkniętym obwodzie, zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej.

$$E = - \frac{d\Phi_{ab}}{dt} \quad (5.21)$$

gdzie Φ_{ab} - strumień pochodzący od obwodu a i przenikający obwód b,

Zgodnie z twierdzeniem Stokesa strumień Φ_{ab} równa się cyrkulacji wzdłuż b potencjału wektorowego A_a wywołanego przez prąd i_a , czyli [41]

$$\Phi_{ab} = \int_b A_a dx_b = \int_b \int_a \frac{\mu}{4\pi r} i_a \frac{dx_a}{r} dx_b \quad (5.22)$$

Tak więc dla ośrodka nieferromagnetycznego ($\mu = \text{constans}$) prawo indukcji przybiera postać

$$E = - \frac{\mu}{4\pi} \int_a \int_b \frac{dx_a dx_b}{r} \frac{di_a}{dt} = - M_{ab} \frac{di_a}{dt} \quad (5.23)$$

gdzie:

M_{ab} - współczynnik indukcji wzajemnej dwu obwodów,

μ - przenikalność magnetyczna ośrodka.

Z symetrii wyrażenia (5.22) wynika, że strumień Φ_{ba} pochodzący od b i przenikający a wyrazi się wzorem: $\Phi_{ba} = M_{ab} i_b$.

W przypadku układu m obwodów, przez które płyną prądy zmienne, wypadkowa siła elektromotoryczna indukcji w każdym obwodzie n w wyniku superpozycji strumieni wyniesie więc

$$E = - \sum_{k=1}^m M_{nk} \frac{di_k}{dt} \quad (5.24)$$

Obliczmy współczynnik indukcji wzajemnej dwóch równoległych odcinków o długości $l_a = l_b = l$ i promieniu r_1 przewodów ułożonych w odległości d. Zakładając $d \gg r_1$ oraz $l \gg r$ można zaniedbać grubość przewodów i na podstawie (5.23) napisać:

$$M_{ab} = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^1 dx_b \int_0^1 dx_a \frac{dx_a dx_b}{r} \int_0^1 \int_0^1 \frac{dx_a dx_b}{\sqrt{d^2 + (x_b - x_a)^2}} \quad (5.25)$$

Uwzględniając znane zależności:

$$\int \frac{dx}{\sqrt{ax^2 + bx + c}} = \frac{1}{\sqrt{a}} \operatorname{ar} \sinh \frac{2ax+b}{\sqrt{4ac-b^2}} + \operatorname{const} \quad (5.26)$$

$$\int \operatorname{ar} \sinh y \frac{x}{d} dx = x \operatorname{ar} \sinh \frac{x}{d} - \sqrt{x^2 + d^2} \quad (5.27)$$

$$\operatorname{ar} \sinh y = \ln y + \sqrt{y^2 + 1}$$

i wykonując kolejno wymagane przekształcenia, otrzymuje się

$$M_{ab} = \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln \frac{1 + \sqrt{1^2 + d^2}}{d} \sqrt{\frac{1^2 + d^2 - d}{1}} \right) \quad (5.28)$$

lub

$$M_{ab} = \frac{\mu l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{1}{d} + \sqrt{\frac{1^2}{d^2} + 1} \right) - \sqrt{\frac{d^2}{1^2} + 1} + \frac{d}{1} \right] \quad (5.29)$$

W przypadku gdy można założyć, że $l \gg d$ otrzymamy po przekształceniach i uproszczeniu

$$M_{ab} \approx \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right) \quad (5.30)$$

lub

$$M_{ab} \approx \frac{\mu l}{2\pi} \ln \frac{l}{d} \quad (5.31)$$

Zależności powyższe zostały wyprowadzone dla obwodów linearnych, lecz można je stosować praktycznie i dla przewodników o skończonym przekroju uwzględniając, że siła elektromotoryczna samoindukcji w żyłach pomocniczych i pole wewnętrzne są stosunkowo znikome.

Żyły kabli i przewodów górniczych można traktować jako przewodniki równoległe o $l \gg d$. Dla sieci trójfazowej z izolowanym punktem gwiazdowym siła elektromotoryczna indukowana w żyłce pomocniczej lub ochronnej m , przy sinusoidalnie zmiennym symetrycznym obciążeniu I żył roboczych a , b , c można obliczyć z wzoru:

$$E_m = \mu f l_z I \sqrt{\frac{1}{4} \left(\ln \frac{d_{am} d_{am}}{d_{bm} d_{cm}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\ln \frac{d_{cm}}{d_{bm}} \right)^2}, \quad V \quad (5.32)$$

gdzie:

l_z - długość żył, m

I - natężenie prądu w żyłce roboczej, A

d - odległość między osiami odpowiednich żył roboczych (a,b,c) i osią żyły ochronnej lub pomocniczej (m).

Gdy żyła ochronna lub pomocnicza ułożone są symetrycznie względem dwóch żył roboczych (np. przewód OnG cztero, pięcio, lub siedmiożyłowy), wzór przyjmuje postać

$$E_m = \mu f l_z I \ln \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \quad (5.33)$$

Z wzoru (5.32) wynika również, że przy pełnej symetrii geometrycznej (np. umieszczenie żyły ochronnej w środku między żyłkami roboczymi) uzyskuje się zerową wartość siły elektromotorycznej indukcji wzajemnej.

Wypadkową siłę elektromotoryczną indukowaną w obwodzie utworzonym przez dwie żyły m i n - ochronną i pomocniczą lub pomocnicze - których osie odległe są od osi żył roboczych o d_m i d_n , obliczamy jako różnicę geometryczną sił elektromotorycznych indukowanych w każdej żyłce oddzielnie.

$$E_{mn} = \frac{1}{2} \mu f l_z I \sqrt{3 \left(\ln \frac{d_{cm} d_{bn}}{d_{cn} d_{bm}} \right)^2 + \left(\ln \frac{d_{am}^2 d_{bn} d_{cn}}{d_{an}^2 d_{bm} d_{cm}} \right)^2} \quad (5.34)$$

Przy częściowej symetrii geometrycznej gdy żyły ułożone są równomiernie na obwodzie koła tzn. $d_{am} = d_{bn} = d_{cn} = d_{\max}$ oraz $d_{an} = d_{cn} = d_{\min}$, otrzymujemy zależność

$$E_{mn} = \sqrt{3} \mu f l_z I \ln \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \quad (5.35)$$

Szczególnym przypadkiem jest para żył pomocniczych w górniczym przewodzie oponowym 7-żyłowym. Trzy żyły pomocnicze tego przewodu skręcone są dodatkowo ze sobą ze skokiem mniejszym niż skok skrętu żył głównych w ośrodek. Uzyskuje się przez to średnią odległość od żył roboczych w przybliżeniu jednakową dla wszystkich żył pomocniczych. W konsekwencji współczynniki indukcji wzajemnej M_m i M_n są sobie równe, a wypadkowa siła elektromotoryczna takiej pary żył praktycznie równa się zero.

Siłę elektromotoryczną indukowaną w jednej żyłce takiego przewodu można obliczyć ze wzoru (5.33) przyjmując średnie odległości mierzone od środka geometrycznego trzech skręconych żył pomocniczych.

W przypadku przepływu prądu tylko w dwóch żyłach roboczych siła elektromotoryczna, obliczona podobnie jak poprzednio wyniesie

$$E_m = \mu f l_z I \left(\ln \frac{d_{bm}}{d_{am}} \right) \quad (5.36)$$

Podobnie wyznaczyć można siłę elektromotoryczną indukowaną w pętli utworzonej z dwóch żył m i n przewodu wielożyłowego, otrzymując wzór

$$E_{mn} = \mu f l_z I \left(\ln \frac{d_{am} d_{bn}}{d_{an} d_{bm}} \right) \quad (5.37)$$

Dla scharakteryzowania wpływu ekranów w zmiennym polu elektromagnetycznym rozpatrzmy propagację sinusoidalnej fali płaskiej w ośrodku o zespolonej przenikalności elektrycznej ϵ_z [13, 31, 41], gdzie:

$$\epsilon_z = \epsilon - j \frac{\gamma}{\omega} \quad (5.38)$$

Rozwiązanie układu równań Maxwella dla takiego przypadku reprezentuje falę tłumioną, której amplituda maleje w sposób wykładniczy przy współczynniku tłumienia β .

W ośrodku słabo przewodzącym $\frac{\gamma}{\omega} \ll \epsilon$, a więc prąd przewodzenia σE możemy zaniedbać w porównaniu z prądem przesunięcia o amplitudzie ϵE . Otrzymuje się wtedy zależności:

- długość fali

$$\lambda_i = \frac{1}{f \sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_w \mu_w}} \quad (5.39)$$

- współczynnik tłumienia

$$\beta_i = \frac{1}{2} \gamma z_i = \frac{1}{2} \gamma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5.40)$$

Z ośrodka izolacyjnego fala przechodzi do ośrodka przewodzącego (ekranu). Część energii fali płaskiej padającej prostopadle na płaszczyznę przewodzącą zostaje odbita, część zaś wchodzi do ośrodka przewodzącego transformując się w falę tłumioną. Podczas dalszej propagacji wygasa ona stopniowo, a związana z nią energia rozprasza się jako ciepło Joule'a.

Ośrodek dobrze przewodzący scharakteryzujemy jako $\frac{\gamma}{\omega} \gg \epsilon$. Możemy więc pominąć prąd przesunięcia jako mały w porównaniu z prądem przewodzenia.

Otrzymujemy więc

$$\lambda_e = \frac{2\sigma}{\sqrt{\pi \mu \gamma f}} \quad (5.41)$$

$$\beta_e = \sqrt{\pi \mu \gamma f} \quad (5.42)$$

$$p_e = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \gamma f}} \quad (5.43)$$

Współczynnik p nazywany głębokością penetracji uważany jest jako wskaźnik szybkości zaniku fali.

Korzystając z twierdzenia Poyntinga, po obliczeniu energii pola pochłoniętej przez ośrodek przewodzący, można dojść do wniosku, że fala w przewodniku zanika już na głębokości $2 \div 3$ razy mniejszej od długości fali.

W przypadku zwarcia ekranów (powłok przewodzących) popłyną w nich prądy, będące wynikiem samoindukcji oraz indukcji wzajemnej. Rozpatrzmy to na przykładzie kabli ekranowanych typu ЗНKnFpy. Zakładamy, że powłoki (ekrany) ołowiane A, B, i C są bardzo cienkie o promieniu r do środka ich grubości. Napięcia na poszczególnych ekranach będą wynikiem spadków napięć na impedancji ekranów wywołanych prądem w ekranach I_A , I_B i I_C , oraz SEM indukcji.

Jeżeli ekrany indywidualne żył nie są ze sobą zwarte na obu końcach, a obciążenie żył roboczych jest symetryczne, zależność dla wartości napięcia przybiera postać

$$U_A = \mu f l I_A \ln \frac{d}{r} \quad (5.44)$$

Otrzymana zależność zgodna jest z (5.33).

W przypadku zwarcia trzech ekranów indywidualnych na obu końcach i ewentualnym uziemieniu tylko na jednym końcu, wypadkowe napięcia na każdym ekranie będzie równe zero, podobnie jak suma prądów w ekranach.

$$I_A = I_B = I_C = \frac{\omega \mu l}{2\pi} I_a \frac{\ln \frac{d}{r}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \left(\frac{\mu l}{2\pi} \ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right)^2}} \quad (5.45)$$

lub

$$I_A I_B = I_C \approx \mu f l \ln \frac{d}{r} \frac{I_a}{\sqrt{R^2 + (\mu f l \ln \frac{d}{r})^2}} \quad (5.46)$$

Straty spowodowane przepływem prądów indukowanych w ekranach i w żyłach ochronnych wywołują dodatkowe nagrzewanie się kabla.

6. ZAKOŃCZENIE

Przewaga właściwości techniczno-ekonomicznych energii elektrycznej nad innymi rodzajami energii, ugruntowana wieloletnim już doświadczeniem praktycznego stosowania w kopalniach, jest niezaprzeczalna. Dalszy rozwój wydobycia węgla również w kopalniach metanowych, szczególnie przy współczesnej technologii opartej na koncentracji i wzroście mocy jednostkowej maszyn górniczych oraz ich automatyzacji, także ze względów choćby tylko technicznych opierał się będzie na stosowaniu energii elektrycznej.

Elektryfikacja podziemi kopalń gazowych powinna być prowadzona ostrożnie lecz konsekwentnie, w oparciu o właściwe, w pełni racjonalne i dające maksimum bezpieczeństwa kryteria oceny zagrożenia od poszczególnych ogniw z uwzględnieniem współczesnych możliwości technicznych. Jest to zagadnienie złożone, wymagające wielokierunkowych badań i stosowania różnych środków. Rozwiązania muszą być kompleksowe i obejmować sposoby zapewnienia ciągłości dostawy energii oraz wyeliminowania lub co najmniej maksymalnego ograniczenia zagrożeń od poszczególnych elementów systemu elektroenergetycznego kopalni.

Środki elektryfikacji i automatyzacji muszą być tak konstruowane, produkowane i eksploatowane, aby zapewniały bezpieczną i niezawodną ich pracę w przewidywanych specyficznych technicznych warunkach środowiskowych. Obate cele są wzajemnie uzależnione i integralnie związane, przy czym pierwszym i podstawowym wymaganiem jest bezpieczeństwo.

Urządzenia stosowane w górnictwie powinny się charakteryzować szczególnie wysokimi wymaganiami dotyczącymi poziomu jakości i nowoczesności. Obiektywna ocena jakości, jako właściwości pierwotnej i jej pochodnej - nowoczesności, powinna opierać się na wymiernych kryteriach. Zazwyczaj są one jednak trudne do liczbowego ujęcia. Niezbędne są długotrwałe i wielokierunkowe badania. Dla oceny jakości urządzeń górniczych należy znać kryteria dotyczące: warunków użytkowania i funkcjonalności oraz niezawodności i trwałości. Decydują warunki użytkowania obejmujące zespół cech określonych właściwości w danych rzeczywistych warunkach otoczenia zapewniających sprawną i bezpieczną pracę. I głównie w tym zakresie wykonano niniejszą pracę.

Przeprowadzone badania, analizy ich wyników oraz sformułowane wnioski określają kierunki oraz sposoby realizacji i rozwiązań tych ważnych problemów. Umożliwiają one opracowanie szczegółowych zaleceń i wytycznych w zakresie konstrukcji i eksploatacji, przyczyniających się do zwiększenia stopnia bezpieczeństwa i niezawodnej pracy współczesnych kopalń. Dalsze badania są niezbędne, przede wszystkim w zakresie określenia intensywności uszkodzeń i żywotności. Znajomość ich powinna umożliwić optymalizację projektowanych układów zasilania i kompleksowej automatyzacji procesu wydobycia węgla.

LLITERATURA

1. Allsop G., Guenault E.M., Nicol A.D.: Intrinsic Safety of Electrical Apparatus the Minimum Ignition Current in Relation to Circuit Constant HMSO, 1946, Paper, nr 104.
2. Babokin I.A.: Analiz pricin wzrywow mietana i ugolnoj pyli w szachtach i miery po ich ustranieniju. Ugol, 1957, nr 7; s.16
3. Bladowski S.: Napięcia krokowe, Energetyka, 1955, nr 1; s.22-26.
4. Bladowski S., Włodek R.: Wpływ wilgoci na właściwości izolacyjne przewodu oponowego. CBKK, Biuletyn Kablowy, 1963, nr 6; s.3-10.
5. Blake J.T., Kitchin D.W.: Effect of Soil Mikroorganisms on Rubber Insulation. Industrial and Engineering Chemistry, 1949, nr 41, s.1633-1641.
6. Bobrow A.I., Szejko W.M., Pietczenko N.G.: Analiz pricin wosplamienienija mietana w szachtach Donbassa. Ugol, 1970 r. nr 3; s.57.
7. Byrka W.F., Rubinsztejn B.Sz.: Issledowanije nadieżnosti elektrooborudowanija oczistnych kombajnow. Elektrotiehnika, 1969 nr 1; s.31-33.
8. Budryk W.: Wentylacja kopalń. WGH, Katowice, 1961; cz.1.Przewietrzenie kopalń.
9. Chorofas D.N.: Procesy statystyczne i niezawodność urządzeń. WNT, Warszawa 1963.
10. Cybulska R.: Badania nad możliwością zatruć czadami postrzałowymi na robotach kamiennych i węglowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1966 r.
11. Frycz A.: Wpływ warunków klimatycznych w kopalniach głębokich na wybór systemów eksploatacji. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1964.
12. Godula T., Stopka Z.: Charakterystyka hydromechaniczna wód podziemnych Rybnickiego Okręgu Węglowego. Przegląd Górniczy, 1964, nr 4; s.176-181.
13. Gaworkow W.A.: Elektrieskije i magnitnyje pola. Swiażizdat, Moskwa, 1951.
14. Grzywak A.: Obwody iskrobezpieczne w układach automatyki górniczej Prace naukowo-badawcze ZKMPW z.73 "Śląsk", Katowice 1970.
15. Kiliński A.: O niezawodności z punktu widzenia metodologii ogólnej. Przegląd Elektrotechniczny, 1967, nr 6.
16. Kisielew A.P.: Pierwicznyje kriterii bezopasnosti elektrieskogo toka promyszennoj czastoty. Mat. II Międzynar. Symp. Uziemień i Ochrony Przeciwporażeniowej, Pol. Wrocła., 1968, wrzesień; s.1-11.
17. Krasucki F.: Kierunki rozwoju elektroenergetycznych kabli i przewodów górniczych. Przegląd Górniczy, 1960, nr 1; s.28.
18. Krasucki F.: Przewody oponowe wysokiego napięcia w zastosowaniu do podziemnych elektroenergetycznych sieci górniczych. Prace Naukowo-Badawcze ZKMPW, komunikat nr 29, WGH, Katowice, 1960; s.3-4.
19. Krasucki F.: Określenia podstawowych kryteriów bezpieczeństwa rażenia prądem elektrycznym w podziemiach kopalń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 124, 1964; Górnictwo, z. 12; s.183-215.
20. Krasucki F.: Teoretyczne i techniczne kryteria bezpieczeństwa w elektroenergetycznych sieciach górniczych. Rozprawa doktorska, czerwiec, 1966; Politechnika Śląska.
21. Krasucki F.: Analiza kształtowania się wypadkowości powodowanej działaniem prądu elektrycznego w kopalniach węgla. Wiadomości Górnicze, 1968, nr 9; s.271-276.
22. Krasucki F.: Wpływ napięcia zasilania na bezpieczeństwo rażenia prądem zmiennym w górnictwie. Mechanizacja Górnictwa, 1968, nr 21; s.20-25.

23. Krasucki F.: Stan izolacji elektrycznej sieci kopalnianej jako kryterium bezpieczeństwa rażenia prądem. Przegląd Górniczy, 1968, nr 2; s.93-99.
24. Krasucki F., Tabaczyński Z., Wajdowicz J.: Piasek kwarcowy jako materiał elektroizolacyjny. Prace Naukowo-Badawcze ZKMPW, z. 65 "Śląsk", Katowice, 1969.
25. Krasucki F.: Niektóre zagadnienia stosowania hydrofobowego piasku kwarcowego w elektrycznych urządzeniach górniczych. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, 1969, nr 3; s.38-41.
26. Krasucki F.: Niektóre zagadnienia ograniczania skutków zwarć doziemnych w sieciach kopalnianych 6 kV. BBPPW, Projekty - Problemy 1969, nr 3; s.19-24.
27. Krasucki F.: Opór izolacji kabli i przewodów górniczych, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., 1969, nr 269, Górnictwo, z. 41; s.261-276.
28. Krasucki F.: Ekran w kablach i przewodach oponowych górniczych. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, 1970, nr 7; s.26-29.
29. Krasucki F.: Konduktancja ekranów ochronnych w oponowych przewodach górniczych. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, 1970, nr 8; s.22-28.
30. Krasucki F.: Problemy techniczno-teoretyczne budowy i stosowania kabli i przewodów w kopalniach gazowych. Międzynar. Symp.Elekt.Kop. Gazowych, PAN-SITG, Katowice 1962;s.70.
31. Krasucki F.: Napięcia indukowane w pomocniczych żyłach kabli i przewodów górniczych. Archiwum Górnictwa, 1970, z.3;s.267-287.
32. Krawczenko W.S., Karpow Je.F., Sierow W.I.: Issledowanija w oblasti iskrobiezopasnosti i awtomatycznej gazowej zaszczyty. Mezinarodni konference, Gottwaldov, 8-10 rijna 1968; ref. 11.
33. Manojłow W.Je.: Problemy elektrobiezopasnosti. GEI, Moskwa -Leningrad, 1961.
34. Michajłow M.M.: Włagoproniczajemost' ograniczeskich dielektrykow.Gose-nergoizdat, Moskwa - Leningrad, 1960.
35. Michajłow W.A., Dawidenko W.I., Łogwin W.W. Łukianow J.P., Sznyriew I.M.: Nadieźnost' apparatury gornych awtomatycznych ustroistw."Tiechnika", Kijew, 1967.
36. Mitrega J.: Aktualna sytuacja górnictwa węglowego w Polsce i perspektywy jego rozwoju. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 269, Górnictwo, z. 41, 1969; s.12-13.
37. Murawjew W.P. Razgilidiejew G.I.: Nadieźnost' sistem elektrosnabżenija i elektrooborudownija podziemnych razrobotok szacht. "Niedra", Moskwa, 1970.
38. Praca zbiorowa: Technika bezpieczeństwa w górnictwie. Gospodarka powietrzem kopalnianym. PWT, Katowice, 1953; s.129-141.
39. Praca zbiorowa: Poradnik górnika. WGH, Katowice, 1959; t.II, cz.2
40. Prikłonskij W.A., Łaptiew F.F.: Własności fizyczne i skład chemiczny wód podziemnych. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1955.
41. Szulkin P., Pogorzelski S.: Podstawy teorii pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa, 1964.
42. Teresiak Z.: Modelowe opory ciała ludzkiego w technice ochrony przeciwporażeniowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, 1968, nr 196, Elektryka XXXV; s.45-73.
43. Walentyłowicz B.: Wybór silnika elektrycznego z uwzględnieniem kryterium trwałości. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, 1964, nr 95 Elektryka z. 36; s.8-18.
44. Wołkowiński: Sztuczne metody zmniejszenia oporności uziemienia uzio-mów. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej. 1965, nr 83; s.3-37.

45. Zarański T.: Analiza wypadków porażeń prądem w górnictwie węglowym. Bezpieczeństwo i Higiena Pracy, 1947, nr 7; s.14.
46. Zyska B., Ratyń E., Kozioł L., Siekierski K.: Korozja mikrobiologiczna gumy oponowej kopalnianych przewodów giętkich. Przegląd Górniczy 1969, nr 7-8; Biuletyn GiG.

STRESZCZENIE

Wykazano, że specyficzne warunki środowiskowe występujące w podziemiach kopalń mają zasadniczy wpływ na prawdopodobieństwo uszkodzeń elektroenergetycznych i elementów automatyki oraz zagrożeń od tych urządzeń. Zebrano i analizowano dane statystyczne w tym zakresie. Uzasadniono konieczność koordynacji wymagań techniczno-środowiskowych, w oparciu o usystematyzowanie pojęć i analizę głównych czynników środowiska kopalnianego. Analizowano wpływ warunków klimatycznych i techniczno-organizacyjnych na bezpieczeństwo i niezawodność pracy środków elektryfikacji i automatyzacji. Podano propozycje określenia umownych technicznych warunków środowiskowych w podziemiach kopalń węgla.

Analizowano i ustalono podstawowe kryteria bezpiecznej elektryfikacji i automatyzacji kopalń, w zakresie rażenia prądem elektrycznym oraz wybuchów i pożarów elektrycznych. W analizie uwzględniono stan ustalony oraz stan przejściowy uszkodzenia i zwarcia doziemnego, względnie bezpośredniego dotyku fazy lub osłon uziemionych, a ponadto wpływ energii rozładowania i napięć indukowanych w obwodach pomocniczych. Selekcjonowano wpływ poszczególnych czynników oraz uzasadniono proponowane sposoby i środki zaradcze.

Wytyczono kierunki prac oraz podano propozycje zmierzające do zwiększenia stopnia niezawodności i bezpieczeństwa, na przykładzie budowy, metod badań i eksploatacji górniczych kabli i przewodów ekranowanych, oraz zabezpieczeń i środków ochron dodatkowych.

Wywody teoretyczne i analityczne dokumentowano wynikami wieloletnich własnych badań i doświadczeń oraz konfrontowano z wynikami badań obcych. Umożliwiają one opracowanie szczegółowych zaleceń i wytycznych w zakresie konstrukcji i eksploatacji, przyczyniających się do zwiększenia stopnia bezpieczeństwa i niezawodnej pracy współczesnych kopalń. Dalsze badania są niezbędne, przede wszystkim w zakresie określenia intensywności uszkodzeń i żywotności. Znajomość ich powinna umożliwić optymalizację projektowanych układów zasilania i kompleksowej automatyzacji procesu wydobycia węgla.

ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДЗЕМЕЛЬЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Резюме

Было показано, что специфическая среда, выступающая в подземелье шахт, имеет основное влияние на вероятность повреждения электроэнергетического оборудования и элементов автоматики а также их опасности. Были собраны и проанализированы статистические данные в этой области. Была доказана необходимость согласования технических требований к среде, путем систематизации понятий и анализа главных факторов шахтной среды.

Анализировалось влияние климатических и технико-организационных условий на безопасность и надежность работы средств электрификации и автоматизации. Кроме того поданы предложения определения условной технической среды подземелья угольных шахт. Были анализированы и определены основные критерия безопасной электрификации и автоматизации шахт в области поражения электрическим током а также взрывов и электрических пожаров. В анализе было учтено зафиксированное и переходное состояния повреждения и замыкания на землю или непосредственного соприкосновения фазы или оборудования и кроме этого влияние энергии разряда и индуцированных напряжений во вспомогательных цепях. Было показано влияние отдельных факторов и обосновано предлагаемые предохранительные способы и средства.

Было намечено направление работ и поданы предложения, направленные на увеличение степени надежности и безопасности на примере строения методов исследования и эксплуатации шахтных кабелей и экранированных проводов а также предохранения и средств добавочной защиты. Теоретические и аналитические выводы были документированы результатами многолетних собственных исследований и опытов и сравнивались с результатами исследований других.

Эти выводы позволяют разработать подробные указания в области конструкций и эксплуатации, способствующие росту степени безопасности и надежности работы современных шахт.

Дальнейшие исследования необходимы прежде всего в области определения интенсивности повреждений и долговечности. Знание их дает возможность оптимизации проектируемых систем питания и комплексной автоматизации процесса добычи угля.

PROBLEMES CONCERNING THE RELIABILITY AND SAFETY OF THE
ELECTRIFICATION AND AUTOMATIEN OF UNDERGROUND WORKINGS IN COAL MINES

S u m m a r y

It has been shown that the environmental conditions in underground mines exert an essential influence upon the probability of damaging electro-energetical devices and elements of automation, as well as upon the endangering of these appliances. Statistical data in this range have been gathered and analysed. The necessity of coordinating all the technical and environmental requirements has been motivated basing on the systematization of conceptions and the analysis of the main factors of the coal mining environment. There has been analysed the effect of climatic as well as of technical and organisational conditions on the safety and reliability of the work of electrical and automatical contrivances. The paper provides suggestions concerning the determination of stipulated technical conditions within the subterranean environments of coal mines.

The fundamental criteria of a safe electrification and automation of mines has been analysed and set up where electric shocks, explosions and fire caused by electric current are concerned. This analysis has taken in to consideration the steady state as well as the transitory state of a damage or earth shorting, or of the direct touch of the phase or earthed screens; besides that notice has been taken of the effect of the discharge energy and induced voltages in cancellary circuits. There has been selected the influence of the respective factors, and the suggested methods and means of remedy have been motivated.

The ways of further investigation work has been marked out, and propositions were put forward aiming at increasing the degree of safety and reliability, basing on the example of the structure, testing methods and exploitation of mining cables and screened wiring, as well as of safety devices and additional protecting appliances.

The theoretical and analytical argumentation has been testified by the results of many years own investigations and experiments and confronted with the results of others. All this has made it possible to develop detailed recommendations and instructions concerning the structure and exploitation which contribute to the safety and reliability of the work in modern coal mines. Further investigations are indispensable, especially those dealing with the determination of the intensity of damages and of vitality. The knowledge of these should facilitate the optimization of projected feed systems and of the complex automation of the coal output process.



ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

ukazują się w następujących seriach:

- A. AUTOMATYKA
- B. BUDOWNICTWO
- Ch. CHEMIA
- E. ELEKTRYKA
- En. ENERGETYKA
- G. GÓRNICTWO
- H. HUTNICTWO
- IS. INŻYNIERIA SANITARNA
- JO. JĘZYKI OBCE
- MF. MATEMATYKA-FIZYKA
- M. MECHANIKA
- NS. NAUKI SPOŁECZNE

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty
serii G:

Górnictwo z. 1, 1956 r., s. 134, zł 20,—	Górnictwo z. 25, 1967 r., s. 96, zł 5,—
Górnictwo z. 2, 1959 r., s. 96, zł 17,10	Górnictwo z. 26, 1968 r., s. 137, zł 10,—
Górnictwo z. 3, 1961 r., s. 130, zł 21,—	Górnictwo z. 27, 1967 r., s. 378, zł 24,—
Górnictwo z. 4, 1962 r., s. 134, zł 10,95	Górnictwo z. 28, 1968 r., s. 185, zł 11,—
Górnictwo z. 5, 1963 r., s. 158, zł 11,90	Górnictwo z. 29, 1968 r., s. 161, zł 9,—
Górnictwo z. 6, 1963 r., s. 154, zł 8,50	Górnictwo z. 30, 1968 r., s. 237, zł 14,—
Górnictwo z. 7, 1963 r., s. 129, zł 6,80	Górnictwo z. 31, 1968 r., s. 119, zł 8,—
Górnictwo z. 8, 1964 r., s. 175, zł 10,20	Górnictwo z. 32, 1968 r., s. 97, zł 6,—
Górnictwo z. 9, 1964 r., s. 133, zł 10,50	Górnictwo z. 33, 1968 r., s. 113, zł 6,—
Górnictwo z. 10, 1964 r., s. 157, zł 8,75	Górnictwo z. 34, 1968 r., s. 111, zł 7,—
Górnictwo z. 11, 1964 r., s. 221, zł 13,10	Górnictwo z. 35, 1968 r., s. 143.
Górnictwo z. 12, 1964 r., s. 304, zł 15,20	Górnictwo z. 36, 1969 r., s. 243, zł 13,50
Górnictwo z. 13, 1965 r., s. 145, zł 8,40	Górnictwo z. 37, 1969 r., s. 234, zł 14,—
Górnictwo z. 14, 1965 r., s. 78, zł 5,—	Górnictwo z. 38, 1969 r., s. 167, zł 10,—
Górnictwo z. 15, 1966 r., s. 79, zł 5,—	Górnictwo z. 39, 1969 r., s. 76, zł 4,50
Górnictwo z. 16, 1966 r., s. 91, zł 7,—	Górnictwo z. 40, 1969 r., s. 107, zł 7,—
Górnictwo z. 17, 1966 r., s. 113, zł 8,—	Górnictwo z. 41, 1969 r., s. 642, zł 42,—
Górnictwo z. 18, 1966 r., s. 291, zł 16,—	Górnictwo z. 42, 1970 r., s. 84, zł 5,—
Górnictwo z. 19, 1966 r., s. 150, zł 11,—	Górnictwo z. 43, 1970 r., s. 58, zł 5,—
Górnictwo z. 20, 1966 r., s. 84, zł 5,—	Górnictwo z. 44, 1971 r., s. 199, zł 16,50
Górnictwo z. 21, 1967 r., s. 270, zł 17,—	Górnictwo z. 45, 1971 r., s. 73, zł 5,—
Górnictwo z. 22, 1967 r., s. 196, zł 12,—	Górnictwo z. 46, 1971 r., s. 63, zł 4,50
Górnictwo z. 23, 1967 r., s. 69, zł 4,—	Górnictwo z. 47, 1971 r., s. 67, zł 6,—
	Górnictwo z. 48, 1972 r., s. 198, zł 15,—

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P. 3351/72/51