

Andrzej CHOLEWA, Sergiusz BORON, Piotr GAWOR
Politechnika Śląska, Gliwice

O POTRZEBIE REZERWOWANIA ZABEZPIECZEŃ ELEKTRENERGETYCZNYCH W KOPALNIANYCH SIECIACH SN

Streszczenie. W artykule przedstawiono przebieg i przyczyny dwóch awarii w górniczych sieciach SN, spowodowanych brakiem właściwego zadziałania układów automatyki zabezpieczeniowej. Przedstawiono sposoby rezerwowania zabezpieczeń zwarciovych w sieciach SN. Wskazano na konieczność konsekwentnego rezerwowania zabezpieczeń na etapie projektowania kopalnianych sieci SN.

THE NECESSITY OF PROTECTION EQUIPMENT BACKING-UP IN MINING MV POWER NETWORKS

Summary. The course and reasons of two failures of MV mining power networks have been described. Failures were caused by the lack of proper operation of network protection system. Means of backing-up the phase-fault protection in MV networks have been described. The necessity of consistent protection equipment backing-up during planning of mining MV power networks has been pointed out.

1. Wprowadzenie

Zabezpieczenia, podobnie jak inne elementy układu elektroenergetycznego, są zawodne. Przyczynami nieprawidłowego działania zabezpieczeń mogą być uszkodzenia [7]: przekładników (5-10%), przekładników (30-43%), obwodów sterowniczych (13-15%), wyzwalaczy (4-8%), wyłączników (15-21%), baterii zasilających (2%). Uszkodzenia te prowadzą do zadziałań zbędnych zabezpieczeń lub braku zadziałań potrzebnych. W pierwszym przypadku zostaje obniżony poziom ciągłości zasilania energią elektryczną, co zwłaszcza dla obiektów podstawowych zakładów górniczych może mieć istotne znaczenie. Skutkiem braku zadziałania zabezpieczenia jest utrzymujące się zakłócenie, co w warunkach zakładów górniczych może prowadzić do poważnych zagrożeń. Na przykład brak zadziałania zabezpieczenia ziem-

nozwarciowego albo zwarciego zwiększa ryzyko zainicjowania pożaru lub wybuchu, a także porażenia prądem elektrycznym. Jednym ze sposobów poprawy niezawodności działania zabezpieczeń jest ich rezerwowanie. W artykule przedstawiono przykładowe awarie spowodowane brakiem rezerwowania zabezpieczeń. Sformułowano wnioski w zakresie możliwości i potrzeby rezerwowania zabezpieczeń, jako środka ograniczającego ryzyko pogłębiania się awarii.

2. Przebiegi przykładowych awarii w kopalnianym układzie elektroenergetycznym

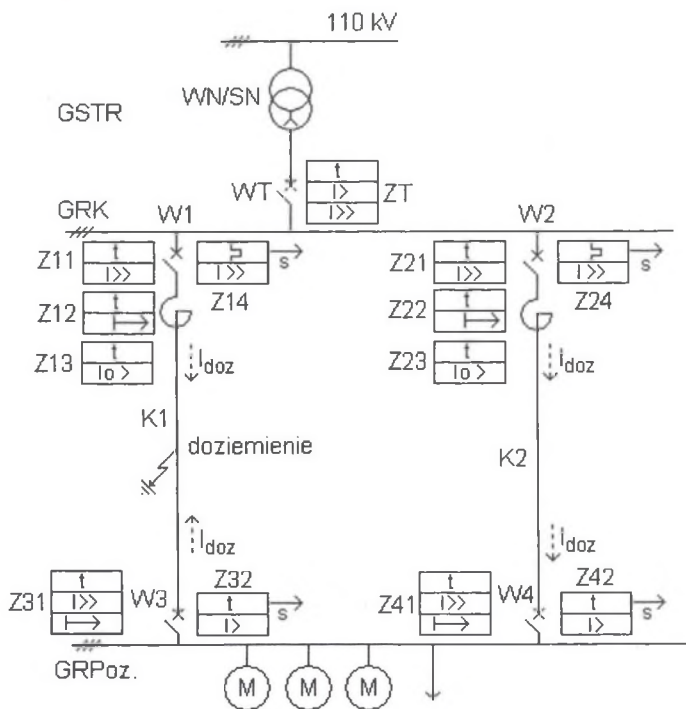
Awaria 1.

Awaria rozpoczęła się od doziemienia w kablu szybowym K1 (rys. 1). Uszkodzona linia była jedną z dwóch linii równoległych, zasilających rozdzielnicę poziomą GRPoz z rozdzielnicy GRK. Doziemienie spowodowało zadziałanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego zwłocznego Z12 w rozdzielnicy GRK (nastawiony czas zwłoki 1 s) i otwarcie wyłącznika W1. Ponadto z wyłącznikiem W1 współpracowały zabezpieczenia: zwarciove Z11 (zwłoka 1 s), przeciążeniowe Z14 (sygnalizujące) i ziemnozwarciowe nadprądowe Z13 (zwłoka 1 s). Analogicznie wyposażone było pole z wyłącznikiem W2.

Po otwarciu się wyłącznika W1 doziemienie w linii K1 nadal było zasilane linią K2. Uszkodzona linia K1 powinna zostać wyłączona po zadziałaniu zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego Z22. Mimo iż zabezpieczenie to zadziało, nie nastąpiło otwarcie wyłącznika W2, ponieważ uszkodzony był wyzwalacz wyłączający, związany z tym wyłącznikiem.

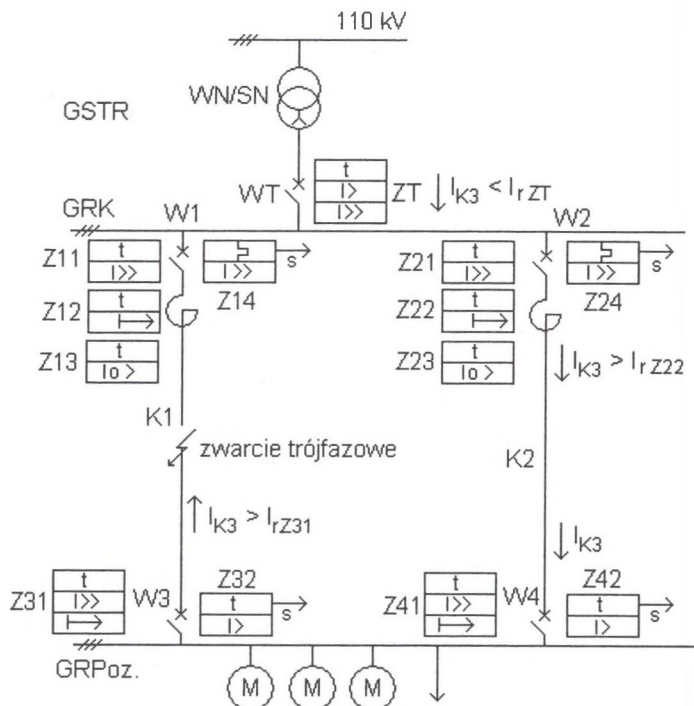
Niewyłączone doziemienie po pewnym czasie przekształciło się w zwarcie trójfazowe o prądzie I_{K3} (rys. 2). Po 0,5 s od chwili powstania zwarcia trójfazowego powinno nastąpić otwarcie wyłącznika W3 w rozdzielnicy GRPoz, na skutek zadziałania znajdującego się w tym polu zabezpieczenia zwarciove nadprądowego z blokadą kierunkową Z31 o prądzie rozruchowym I_{rZ31} , ponieważ zwarcie znajdowało się w strefie zabezpieczanej tego zabezpieczenia. Zabezpieczenie Z31 nie zadziało, ponieważ obwody napięciowe jego przekaźnika pomiarowego nie były zasilane. Prawdopodobnie podczas doziemienia nastąpiło przepalenie się dwóch wkładek topikowych bezpieczników przekładnikowych w polu pomiarowym rozdzielnicy GRPoz (w polu pomiarowym znajdowały się trzy przekładniki napięciowe o układzie połączeń jak w przypadku filtra składowej zerowej napięcia). Przyczyną przepalenia się

wkładek topikowych przekładnikowych mogły być przetężenia spowodowane przepięciami ziemnozwarciowymi podczas stosunkowo długo trwającego (kilkadziesiąt sekund) doziemienia (na skutek przepięć następowało nasycenie się rdzeni przekładników).



Rys. 1. Schemat sieci zasilającej rozdzielnicę poziomą i jej zabezpieczeń w początkowej fazie awarii
 Fig. 1. Scheme of the network supplying underground switchgear with protection equipment in the initial phase of failure

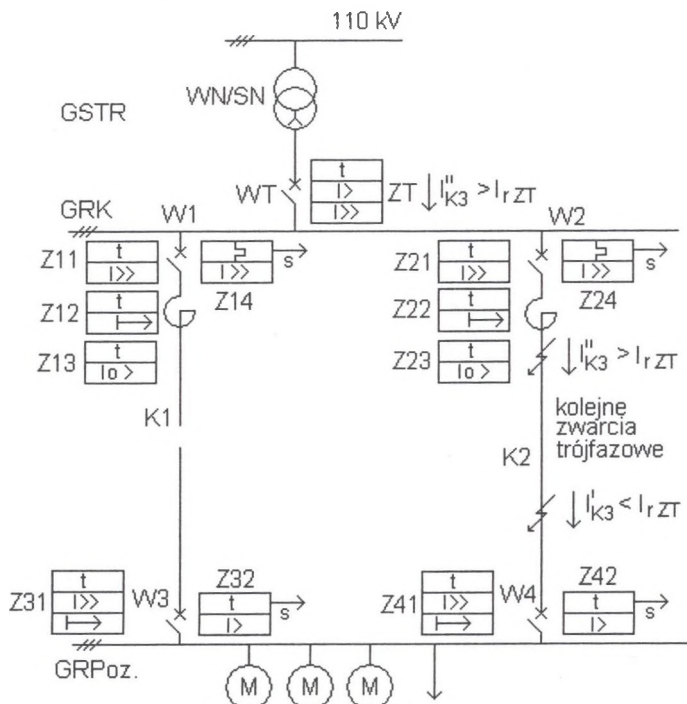
Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne z blokadą kierunkową Z41, zainstalowane w polu wyłącznika W4 nie powinno zadziałać, ponieważ zwarcie znajdowało się poza zabezpieczaną przez nie strefą. W przypadku gdy nie zadziałało zabezpieczenie Z31, powinno zadziałać zabezpieczenie zwarciovie Z21 w rozdzielnicy GRK. Zabezpieczenie to zostało pobudzone i zadziałało ($I_{K3} > I_{rZ21}$), ale nie spowodowało otwarcia wyłącznika W2, ponieważ, jak już zaznaczono, uszkodzony był wyzwalacz wyłączający. Kolejne zabezpieczenie zwarciovie ZT znajdowało się w polu dopływowym rozdzielnicy GRK. Z uwagi na duże wartości prądów roboczych (zwłaszcza w stanach roboczych niewłaściwych) zabezpieczenie to posiadało wysoką nastawę prądową I_{rZT} (7200 A), co uniemożliwiało jego zadziałanie w początkowej fazie awarii ($I_{K3} < I_{rZT}$).



Rys. 2. Schemat sieci zasilającej rozdzielnicę poziomą i jej zabezpieczeń po przekształceniu się doziemienia w zwarcie trójfazowe

Fig. 2. Scheme of the network supplying underground switchgear with protection equipment after failure evolving from earth-fault into 3-phase fault

W tych warunkach utrzymujące się zwarcie międzyfazowe spowodowało bardzo duży przyrost temperatury żył roboczych oraz uszkodzenia izolacji kabli, biorących udział w przewodzeniu prądu zwarciovego. Spowodowało to uszkodzenia w różnych miejscach tych kabli, „skracanie się” pętli zwarciovowej i wzrost wartości prądu zwarciovego (I_{K3}). Wyłączenie zwarcia nastąpiło dopiero wtedy, gdy „przeniósł” się ono na początek linii, za dławik (rys. 3). W tym miejscu prąd zwarciovowy (I_{K3}) przekraczał 7 kA i był porównywalny z nastawami zabezpieczenia zwarciovego zwłocznego ZT w polu dopływowym. Wtedy kiedy czas pobudzenia zabezpieczenia ZT przekroczył nastawiony czas zwłoki, tj. 2,5 s nastąpiło otwarcie wyłącznika WT. Przed otwarciem wyłącznika WT zarejestrowane zostały kilkakrotne pobudzenia zabezpieczenia ZT, ale trwały one za krótko, aby spowodować zadziałanie tego zabezpieczenia. Można przypuszczać, że powodem tych pobudzeń były międzyfazowe zwarcia łukowe w kablu szybowym.



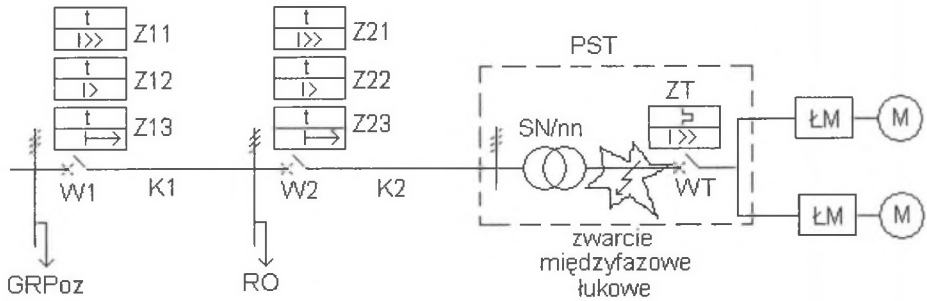
Rys. 3. Schemat sieci zasilającej rozdzielnicę poziomą i jej zabezpieczeń w końcowej fazie awarii (podczas zwarcia międzyfazowych w linii K2)

Fig. 3. Scheme of the network supplying underground switchgear with protection equipment in the final phase of failure (during phase-faults in the line K2)

W wyniku awarii całkowitemu lub częściowemu uszkodzeniu uległa część kabli zasilających m.in. pompy głównego odwadniania i stację wentylatorów głównych. Wysoka temperatura, powstała wskutek przepływu prądu zwarciovego w czasie ok. 2,5 min, spowodowała wydzielanie się dymów z osłon kabli elektroenergetycznych, co stworzyło zagrożenie dla załogi przebywającej w szybie (prace remontowe) i pompowni dołowej.

Awaria 2.

Na rys. 4 przedstawiono schemat zasilania ognioszczelnej przewoźnej stacji transformatorowej PST. Awaria zapoczątkowana została prawdopodobnie wystąpieniem zwarcia łukowego w komorze niskonapięciowej stacji transformatorowej [1]. Charakter i rozmiary zniszczeń wskazywały jednoznacznie, że ich przyczyną był swobodnie palący się łuk elektryczny (wypalenie się i częściowe wyparowanie osprzętu elektrycznego, stanowiącego wyposażenie komory DN, w tym wyłącznika i centralnego zabezpieczenia upływowego oraz przewodów łączących izolatory przepustowe z wyłącznikiem).



Rys. 4. Schemat sieci zasilającej przewoźną stację transformatorową i jej zabezpieczeń
 Fig. 4. Scheme of the network supplying mobile transformer substation and its protection equipment

W wyniku awarii przez pochłaniacz ognia i szczeliny złącz ognioszczelnych osłony stacji wydostały się gazy, co spowodowało zadziałanie czujnika tlenu węgla i czterech wycofujących się z zagrożonego rejonu pracowników użyło aparatów ucieczkowych. Według zapisu, dokonanego w książce ruchu rozdzielnicy RO nastąpiło zadziałanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego Z23 i otwarcie wyłącznika W2. Nie odnotowano zadziałania zabezpieczenia zwarciovowego Z21, ani zabezpieczenia przeciążeniowego Z22. Nastawy zabezpieczeń w polu rozdzielczym, zasilającym uszkodzoną stację spełniały wymagania przepisów. Brak zadziałania zabezpieczenia zwarciovowego Z21 mógł być spowodowany zbyt małą wartością prądu zwarciovowego, ograniczoną przez znaczącą rezystancję swobodnie palącego się łuku elektrycznego. Czas opóźnienia działania zabezpieczenia przeciążeniowego przy stosunkowo małym prądzie pobudzającym (ok. 6. krotnie wyższym od prądu nastawionego) wynosił kilka sekund. Zadziałanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego w polu rozdzielczym SN podczas zwarcia łukowego w komorze dolnego napięcia należy traktować jako przypadkowe, powodowane błędami filtru składowej zerowej prądu (przekładnika Ferrantiego).

3. Zasady rezerwowania zabezpieczeń

Wymaganie dotyczące rezerwowania jest jednym z istotnych wymagań stawianych zabezpieczeniom (wiąże się ono z niezawodnością działania zabezpieczeń). Do zwiększania niezawodności zabezpieczeń sieci kopalnianych, poprzez rezerwowanie nie przywiązuje się dotychczas należytej wagi, mimo iż istnieją w tym zakresie określone zasady. Na przykład w [4] podano następujące, szczegółowe zalecenia i wymagania

- zaleca się, aby zabezpieczenie jednego urządzenia (zabezpieczenie podstawowe) było równocześnie zabezpieczeniem rezerwowym dla urządzenia sąsiedniego w kierunku od źródła zasilania, w razie niezadziałania zabezpieczenia tego urządzenia lub jego wyłącznika,
- w przypadkach, kiedy zabezpieczenie podstawowe nie może, z uwagi na swoją zasadę działania, pełnić funkcji zabezpieczenia rezerwowego przy uszkodzeniach urządzenia sąsiedniego należy zainstalować lokalne zabezpieczenie rezerwowe,
- w przypadkach, kiedy dla zapewnienia właściwego zabezpieczenia rezerwowego dla sąsiedniego urządzenia konieczne jest skomplikowane zabezpieczenie rezerwowe lub, gdy zapewnienie właściwego zabezpieczenia rezerwowego jest technicznie niewykonalne, dopuszcza się:
 - a) skrócenie strefy zabezpieczanej rezerwowej w określonych sytuacjach,
 - b) niewybiórcze działania zabezpieczenia rezerwowego,
 - c) zastosowanie innego rozwiązania zastępczego,
- zabezpieczenia rezerwowe stanowiące oddzielny zestaw zaleca się wykonywać, tak aby mogły one być kontrolowane lub naprawiane niezależnie przy włączonym urządzeniu zabezpieczanym.

Również w normie [2] zwraca się uwagę na potrzebę rezerwowania zabezpieczeń. W punkcie 2.1 „Wymagania ogólne dotyczące zabezpieczeń” sformułowano wymaganie: *Zabezpieczenia zwarciove rezerwowe powinny być stosowane w sieciach o napięciu znamionowym powyżej 1 kV. Zabezpieczenie zwarciove zwłoczne podstawowe powinno być tak dobrane, aby mogło być jednocześnie zabezpieczeniem rezerwowym dla zabezpieczenia następnego w kierunku od źródła zasilania. Dopuszcza się skrócenie strefy zabezpieczanej przez zabezpieczenie rezerwowe, jeżeli zabezpieczenie to nie może zapewnić wyłączenia zwarć za transformatorami, na liniach wyposażonych w dławiki lub na końcu następnego odcinka.*

W sieciach SN o stosunkowo prostej strukturze najczęściej stosuje się rezerwowanie zdalne lub lokalne [6]. Rezerwowanie zdalne polega na tym, że automatyka zabezpieczeniowa danego obiektu elektroenergetycznego jest zdolna do z góry zaprogramowanego reagowania na zakłócenia występujące w sąsiadującym z nim obiekcie. Jako zabezpieczenia rezerwowe określonych linii (stref) wykorzystywane są zabezpieczenia podstawowe odcinków sąsiednich, wcześniejszych w kierunku źródła, przy zastosowaniu zasady stopniowania czasów. Zadanie rezerwowania spełniają zabezpieczenia nadprądowe zwłoczne. Zaletą rezerwy zdalnej jest to, że nie wymaga ona dodatkowego wyposażenia, jedynie odpowiedniego doboru

nastaw istniejących już zabezpieczeń (zabezpieczenia analogowe) lub odpowiedniego ich zaprogramowania (zabezpieczenia cyfrowe).

Rezerwowanie lokalne może być zrealizowane na dwa sposoby. Pierwszy polega na podwajaniu zabezpieczenia (rezerwa lokalna zabezpieczeniowa). Zaleca się, aby zabezpieczenie rezerwowe działało w oparciu o inne kryterium. Stopień rezerwy lokalnej oraz stopień dublowania elementów zabezpieczenia podstawowego zależy od ważności zabezpieczanego elementu układu elektroenergetycznego. Drugi sposób, tzw. rezerwa lokalna wyłącznikowa, polega na uzupełnieniu zabezpieczeń odpływów układem, powodującym otwarcie wyłączników we wszystkich polach dopływowych, gdy zawiedzie wyłącznik (związany z nim wyzwalacz wyłączający) danego odpływu [7].

4. Ocena realizacji rezerwowania zabezpieczeń w analizowanych przypadkach awaryjnych

W obydwu analizowanych w rozdz. 2. przypadkach ciężkość skutków awarii (w tym również zagrożenie życia lub zdrowia ludzi) wynikała m.in. z faktu, że nie zadziałały w porę układy automatyki zabezpieczeniowej, a tym samym z niedopuszczalnie długiego utrzymywania się zakłócenia (zwarcia międzyfazowego).

W pierwszym przypadku (rys.1, 2, 3) zasada rezerwowania zabezpieczeń została zastosowana prawidłowo. Podczas doziemienia w kablu K1 zadziałały podstawowe zabezpieczenia Z12 i Z22. Gdyby nie zawiódł wyzwalacz wyłącznika W2 doziemienie zostałoby wyłączone i do zwarcia trójfazowego nie doszłoby. Jako zabezpieczenia ziemnozwarciowe rezerwowe lokalne linii K1 można potraktować zabezpieczenia zerowoprądowe Z13 i Z23. Po przekształceniu się doziemienia w zwarcie trójfazowe, zabezpieczeniem podstawowym linii K1 było zabezpieczenie Z31. Wobec braku sygnału napięciowego (przepalenie się bezpieczników w polu pomiarowym) zabezpieczenie to nie zadziałało, a zdalna rezerwa, którą miało zapewnić zabezpieczenie Z21, była unieruchomiona, z uwagi na uszkodzenie wyzwalacza wyłącznika W2. Z kolei zdalna rezerwa zabezpieczenia Z21, której rolę mogło pełnić zabezpieczenie ZT w polu dopływowym, nie zadziałała ze względu na zbyt wysoką nastawę prądową, w odniesieniu do zwarć międzyfazowych w linii K1 i w znacznej części linii K2. Strefa rezerwowania zabezpieczenia Z21 przez zabezpieczenie ZT została znacznie skrócona (zgodnie zresztą z przedstawionymi w rozdz. 2 zasadami). Tak więc, mimo zastosowania zasad rezerwowa-

nia zdalnego doszło do poważnej awarii na skutek braku rezerwowania lokalnego wyzwalacza (rezerwa wyłącznikowa) i obwodów sygnałów wejściowych napięciowych.

W drugim przypadku (rys. 4) zabezpieczeniem podstawowym od zwarć międzyfazowych, na wyprowadzeniach transformatora SN/nn było zabezpieczenie Z21. Brak jego zadziałania prawdopodobnie był spowodowany ograniczeniem prądu zwarciovego przez rezy-stancję palącego się łuku elektrycznego. Rezerwą zdalną powinno być zabezpieczenie Z11. Z przebiegu awarii wiadomo, że zabezpieczenie to nie zadziałało. Rezerwowanie zdalne za-bezpieczeń w promieniowych górniczych sieciach SN, zasilających przewoźne stacje trans-formatorowe nie jest zagadnieniem łatwym i wymaga dokładniejszej analizy, a w konsekwen-cji ustalenia warunków i zasad praktycznego stosowania. Jednym ze sposobów ułatwiających rezerwowanie mogłoby być wprowadzenie dodatkowych zabezpieczeń (i wyłączników) na stronie górnego napięcia w przewoźnych stacjach transformatorowych oraz odpowiednio do-branych zabezpieczeń na dopływach rozdzielnic SN (rezerwa lokalna wyłącznikowa).

5. Wnioski

1. Należy dążyć do poszerzania zakresu wykorzystywania rezerwowania lokalnego po-szczególnych elementów układu automatyki zabezpieczeniowej (np. dwa wyzwalacze wyłączające wyłącznik).
2. Jedną z możliwości poprawy niezawodności elementów układu automatyki zabezpiecze-niowej, których rezerwowanie jest trudne lub nieuzasadnione technicznie (np. rezerwo-wanie sygnałów wejściowych przekaźników zabezpieczeniowych) jest wprowadzenie częstszej diagnostyki ich stanu.
3. W przypadkach gdy uzyskanie rezerwowania zdalnego jest szczególnie utrudnione (np. pola odpyłkowe linii zasilającej jedną lub kilka przewoźnych stacji transformatoro-wych; należy rozważyć zastosowanie rezerwy lokalnej wyłącznikowej. W wielu przy-padkach wymagałoby to odpowiedniego wyposażenia pól dopływowych w rozdzielni-cach pośrednich i oddziaływych.
4. Niezbędne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy warunków i zasad (w tym przepi-sowych) rezerwowania zabezpieczeń elektroenergetycznych, w odniesieniu do wybra-nych obiektów kopalnianego układu elektroenergetycznego.

LITERATURA

1. Gawor P., Cholewa A., Przygodzki A.: Analiza możliwych przyczyn uszkodzeń ognioszczelnych przewoźnych stacji transformatorowych. Materiały X Krajowej Konferencji Elektryki Górniczej: Nowoczesne urządzenia elektryczne zasilające i napędowe w zakładach górniczych”. Jarnołtówek 8-10 września 2004 r.
2. PN-G-42042:1998 Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej – Zabezpieczenia zwarciove i przeciążeniowe – Wymagania i zasady doboru.
3. PN-G-42044:2000 Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej – Zabezpieczenia ziemnozwarciowe – Wymagania i zasady doboru.
4. Przepisy budowy urządzeń elektroenergetycznych. Instytut Energetyki. Warszawa, Wydaw. Przemysłowe WEMA, 1997.
5. Sozański J.: Niezawodność zasilania energią elektryczną. Warszawa, WNT 1982.
6. Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych. Warszawa, WNT 1999.
7. Żydanowicz J., Namiotkiewicz M.: Automatyka zabezpieczeniowa w elektroenergetyce. Warszawa, WNT 1983.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński