

Florian KRASUCKI  
Zbigniew KOWALSKI

## KRYTERIA OCHRONY PRZEPIĘCIOWEJ PRZY STOSOWANIU ŁĄCZNIKÓW PRÓŻNIOWYCH W GÓRNICZYCH SIECIACH NISKONAPIĘCIOWYCH

**Streszczenie.** W pracy analizowano mechanizmy uszkodzeń izolacji maszyn przepięciami, wywołwanymi stosowaniem łączników próżniowych. Wskazano na duży rozrzut wartości charakterystycznych obwodu i prądów ucięcia w niskonapięciowych sieciach górniczych oraz ich wpływ na wartości przepięć komutacyjnych. Analizowano prędy ucięcia łączników próżniowych oraz indukcyjności i pojemności fazowe silników elektrycznych napędów maszyn górniczych. Stwierdzono, że łączniki próżniowe nie nadają się do łączenia silników o małej mocy, w warunkach zmiennych konfiguracji sieci, bez ochronników przepięciowych koordynujących poziom izolacji. W jedno-fazowym obwodzie indukcyjnym analizowano charakterystyczny dla sieci górniczej układ łączeniowy - szeregowo połączonych łączników magnetywduchowych i próżniowych; podano algorytm obliczenia przepięć w takich warunkach. Wykazano, że maksymalna wartość przepięcia na odbiorniku, którego obwód jest przerywany łącznikiem próżniowym już po wyłączeniu prądu obciążenia, nie zależy od indukcyjności odbiornika a jedynie od stosunku pojemności linii zasilającej i odbiornika. W tym aspekcie analizowano warunki optymalizacji parametrów sieci. Przedstawiono równania wyjściowe do analizy przepięć w warunkach transpozycji sekwencji łączeniowych w sieciach trójfazowych z łącznikami próżniowymi.

### 1. WSTĘP

Projektowanie i eksploatacja górniczych sieci niskonapięciowych z łącznikami magnetywduchowymi (powietrznymi normalnościśnieniowymi) wymagają stosowania rutynowych już niejako przedsięwzięć w zakresie ochrony zwarciowej, przecięzeniowej i kontroli stanu izolacji.

Napięcia wyższe od największego napięcia roboczego występują w tych sieciach sporadycznie; przyczyną ich są czynności łączeniowe w części wysokonapięciowej oraz zwarcia międzyfazowe i doziemne [1]. Przepięcia te mają różne przebiegi o stosunkowo długim czasie trwania, przy czym wartości amplitud z reguły nie przekraczają kilkakrotnej wartości napięcia znamionowego i mieszczą się w granicach napięć probierczych izolacji. W czasie czynności łączeniowych w sieciach niskonapięciowych z łącznikami magnetywduchowymi z reguły nie występują przepięcia niebezpieczne dla urządzeń elektroenergetycznych. Łuk łączeniowy gaśnie najczęściej przy wartości chwilowej prądu równej zeru. Energia pola magnetycznego w indukcyjnościach

obwodu jest równa zeru i napięcia na pojemnościach sieci nie wzrastają powyżej napięć roboczych.

Wobec systematycznego zwiększenia mocy zainstalowanej maszyn i mocy zwarciowych sieci kopalnianych uzasadnione jest stosowanie aparatury opartej na nowej technice, zapewniającej łącznikom dużą trwałość i zdolność łączeniową w specyficznych warunkach środowiskowych kopalni, przy stosunkowo małej masie i małych wymiarach skrajnych. Wymaganiom tym odpowiadają łączniki próżniowe produkowane w kraju i zagranicą. Hermetyczność układu stykowo-gazeniowego łączników próżniowych w znacznym stopniu ogranicza powstawanie agresywnego środowiska korozyjnego, co nie jest bez znaczenia dla konstrukcji osłon przeciwybuchowych, a dowolne położenie pracy, odporność na drgania i udary preferują łączniki próżniowe do stosowania na maszynach ruchomych.

Łączniki próżniowe mają jednak tendencję do generowania przepięć, wskutek wymuszonego "ucinania" prądu łuku w okolicach przejścia przez zero i "ucinięcia" prądu łuku w warunkach transpozycji sekwencji łączeniowych, przy współpracy z łącznikami matnetowymuchowymi (powietrznymi normalnociśnieniowymi) w obwodach indukcyjnych. Niezbędna jest więc zmiana wymagań i kryteriów w zakresie projektowania oraz eksploatacji takich sieci.

Przebiegi komutacyjne wywoływane stosowaniem łączników próżniowych w obwodach indukcyjnych mogą osiągać duże wartości. Powoduje to zagrożenie dla ciągłości ruchu i bezpieczeństwa w kopalni. Mogą być bowiem przyczyną zwarć międzyfazowych, doziemnych, międzyzwojowych maszyn i urządzeń. Przebiegi komutacyjne mają charakter krótkotrwałych impulsów napięciowych o czasie trwania od kilku mikrosekund do kilku milisekund, a amplitudy ich osiągają wartości od kilku do kilkudziesięciu tysięcy woltów.

Na przebiegi te szczególnie narażone są izolacja główna i międzyzwojowa silników elektrycznych. W czasie normalnej pracy na izolację główną działa natężenie pola elektrycznego wynikające z napięcia fazowego a na izolację międzyzwojową natężenie pola elektrycznego, wynikające z napięć sąsiednich zwojów. Natężenie pola elektrycznego może znacznie wzrosnąć wskutek przepięć komutacyjnych o dużej stromości, generowanych przez łączniki próżniowe. Na izolacji głównej wskutek szeregowego uwarstwienia materiału stałego i powietrza pomiędzy krawędziami blach a izolację występuje wówczas duże natężenie pola elektrycznego. W szczelinach powietrznych powstają warunki dla jonizacji, szczególnie w otoczeniu o dużej wilgotności.

Połączenia czołowe znajdują się w analogicznych warunkach, gdyż rozkład pola elektrycznego na połączeniach czołowych jest niejednostajny w wyniku szeregowego uwarstwienia stałego materiału izolacyjnego z powietrzem i zanieczyszczeń tworzących drogi przewodzące. Ma to istotne znaczenie dla trwałości izolacji w warunkach generowanych przepięć przez łączniki próżniowe, przepięć występujących z dużą częstością.



Mechanizm przebicia stałych materiałów izolacyjnych udarami przepięć komutacyjnych ma głównie charakter elektryczny. Zniszczenie materiału izolacyjnego przy tych wyładowaniach zupełnych następuje przez działanie sił pola elektrycznego a nie efektu termicznego.

Wynika to z faktu, że prędkość narastania napięcia jest duża i dielektryk nie zdąży się nagrzać do wysokiej temperatury wskutek strat dielektrycznych, przy której traci własności izolacyjne. Mechanizm wyładowań zupełnych, spowodowanych przepięciami generowanymi przez łączniki próżniowe, nie ma więc charakteru cieplnego.

## 2. WPŁYW PRZEPIEĆ KOMUTACYJNYCH NA IZOLACJĘ SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH

Wyładowaniem zupełnym sprzyjają mikro uszkodzenia układu izolacyjnego, spowodowane oddziaływaniem elektrodynamicznym przepływających przez uzwojenia prądów (przede wszystkim prądów rozruchowych silników klatkowych). Zwłaszcza połączenia czołowe silników elektrycznych są narażone na działanie sił elektrodynamicznych, a wskutek cieplnego starzenia się izolacji są one podatne na uszkodzenia mechaniczne w postaci mikropęknięć.

Na dwa sąsiednie przewody w najsłabszym konstrukcyjnie elemencie, tj. czołe uzwojenia, będzie działać siła elektrodynamiczna proporcjonalna do kwadratu przepływającego prądu rozruchowego. Siły te sięgają, zależnie od mocy silnika w udarach, do kilku tysięcy niutonów. Częste działania sił dynamicznych prowadzą w konsekwencji do uszkodzeń mechanicznych izolacji maszyn, głównej i międzyzwojowej, które ujawniają się w postaci mikropęknięć tworzących szczeliny powietrzne.

Przy szeregowym uwarstwieniu szczelin powietrznych ze stałym materiałem izolacyjnym, w szczelinach powietrznych występuje bardzo duże natężenie pola elektrycznego. W warunkach napięć roboczych materiał może utrzymać (mimo istnienia mikropęknięć) przez bardzo długi okres swoje własności izolacyjne, nawet w warunkach występowania jonizacji - w przypadku gdy natężenie pola elektrycznego w tych szczelinach przekroczy wytrzymałość powietrza. Wynika to stąd, że związane z jonizacją wyładowania powodują tylko zwieranie samych szczelin.

Niemniej jonizacja jest związana z przepływem prądu elektrycznego, którego obwód zamyka się przez dielektryk stały. Stały materiał izolacyjny ma dużą wytrzymałość elektryczną w porównaniu z powietrzem. Obwód prądu zamyka się przez pojemność dielektryku stałego. Szczeliny powietrzne stanowią niejako przewodzące okładziny.

W wyniku "ucięcia" prądu przez łącznik próżniowy, energia zawarta w polu magnetycznym nie jest oczywiście równa zeru. Energia ta jest źródłem przebiegu napięcia na pojemnościach obwodu - napięcia o dużej stromości narastania. Może to doprowadzić do wyładowania zupełnego, zniszczenia osłabionego układu izolacyjnego i w konsekwencji do zwarcć międzyfazowych, doziemnych lub międzyzwojowych.

W wyniku mikropęknięć szeregowy układ izolacyjny dwóch dielektryków, nawet o tych samych stałych dielektrycznych i natężeniu pola w dielektrykach, przekształca się w układ szeregowo-równoległy, gdy w jednym z dielektryków powstaje mikropęknięcie i objętość ta wypełnia powietrze, lub w układ równoległy (gdy mikropęknięcie izolacji wystąpi w obu dielektrykach i szczeliny te wypełni powietrze).

W tym ostatnim przypadku wytrzymałość układu zależy tylko od dielektryku o najmniej wytrzymałości i na nim nastąpi przeskok lub przebicie.

W pierwszym przypadku natężenie pola rozkłada się na dielektrykach stałych  $\epsilon_1$  i  $\epsilon_2$  w znanym stosunku  $K_1/K_2 = \epsilon_2/\epsilon_1$ . Powietrze o mniejszej wytrzymałości obniża wytrzymałość całego układu. Na nim wystąpi największe natężenie pola elektrycznego, które doprowadzi do wyładowania i w konsekwencji kaskadowego zniszczenia izolacji dielektryku nieuszkodzonego mechanicznie. Niezależnie od przedstawionego mechanizmu uszkodzenia izolacji następuje obniżenie wytrzymałości elektrycznej układu na przepięcia komutacyjne generowane łącznikami próżniowymi wszędzie tam, gdzie występuje szeregowe połączenie stałego materiału izolacyjnego z powietrzem, wskutek złego wypełnienia materiałem nasycającym, bądź występowania szczelin powietrznych lub pęcherzy.

W praktyce mamy do czynienia najczęściej z uwarstwieniem ukośnym. Z tych względów układy rzeczywiste cechuje mała odporność na przepięcia komutacyjne. Główną przyczyną są wyładowania ślizgowe na dużych płaskich powierzchniach dielektryku, zabrudzenia i zawilgocenia tych powierzchni.

### 3. CHARAKTERYSTYKA OBWODÓW NISKONAPIĘCIOWYCH WYŁĄCZANYCH ŁĄCZNIKAMI PRÓŻNIOWYMI

Omówiony mechanizm obniżania wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego zwiększa podatność maszyn na uszkodzenia w sieciach, w których są stosowane łączniki próżniowe. Energia źródeł generujących przepięcia w określonych konfiguracjach sieci, przy dużych wartościach prądów "ucięcia", może uszkodzić układy izolacyjne dobrane prawidłowo - odpowiednio do wymagań statycznej wytrzymałości napięciem probierczym w określonych normami warunkach badań. Duża częstość łączeń aparatów manewrowych, sterujących pracą maszyn górniczych, zwiększa prawdopodobieństwo występowania dużych wartości przepięć komutacyjnych.

W górniczych sieciach niskonapięciowych zwiększa się też udział liczby przyrządów półprzewodnikowych oraz aparatury pomiarowej i zabezpieczeniowej, włączanej bezpośrednio lub pośrednio przez przekładniki prądowe i napięciowe.

Wyładowania zupełne w dielektrykach i przyrządach półprzewodnikowych spowodowane przepięciami komutacyjnymi, generowanymi przez łączniki próżniowe przy wyłączaniu obwodu, są szczególnie niebezpieczne w warunkach



zwiększonego zagrożenia bezpieczeństwa eksploatacji w podziemiach kopalń. W tych okolicznościach ponowne załączenie obwodu będzie załączeniem napięcia na uszkodzony odcinek sieci. Przepięcia generowane przez łączniki próżniowe przy załączaniu są związane z odeskami sprężystymi, a częstość występowania jest zależna od ilości i czasu trwania odskoków.

Analiza parametrów górniczej sieci niskonapięciowej o izolowanym punkcie zerowym wskazuje na duży rozrzut pojemności poszczególnych faz względem uziemionej obudowy i fazowej indukcyjności. Dla silników o mocy od 2,8 kW do 132 kW [5], przy napięciu 500 V, górna wartość pojemności poszczególnych faz względem ziemi kształtuje się w granicach od  $3 \cdot 10^{-9}$  F do  $24 \cdot 10^{-9}$  F, a dolna wartość od  $1 \cdot 10^{-9}$  F do  $8 \cdot 10^{-9}$  F, przy czym silniki o mniejszej mocy mają mniejszą pojemność a silniki o mocy większej - większą.

Indukcyjność fazowa przy napięciu 500 V, wyznaczona z pomiarów prądu stanu jałowego silników, kształtuje się w granicach od 0,250 H do 0,015 H, przy czym silniki mniejszej mocy mają większą indukcyjność, a silniki większej mocy - mniejszą [4].

Taka zależność pojemności i indukcyjności uzasadnia pogląd, że silniki małej mocy są głównymi źródłami przepięć w sieciach górniczych. Przepięcia w sieciach, w których silniki wyłączane są łącznikami próżniowymi, osiągają wartości rzędu kilkunastu do kilkudziesięciu kilowoltów, łączniki próżniowe nie nadają się do łączenia silników o małej mocy - bez dodatkowych ochronników przepięciowych koordynujących poziom izolacji.

Moc znamionowa silnika indukcyjnego stanowi istotne kryterium projektowania i eksploatacji górniczych sieci niskonapięciowych. W tabelicy 1 podano wybrane przeciętne parametry obwodów przepięciowych (rys. 1) od-

Tabela 1

Wybrane parametry obwodów przepięciowych odbiorników (silników) trójfazowych o pojemnościach własnych  $C_w$  i indukcyjnościach  $L$ , wyłączanych łącznikami próżniowymi w sieciach 500 V

$P_n$	f	Wyłączenie: I stadium		Wyłączenie: II stadium
		$Z_{1A} = \sqrt{\frac{L}{C_w}}$	$Z_{1B} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C_w}}$	$Z_{2B} = \sqrt{\frac{L}{C_w}}$
kW	kHz	$10^3 \Omega$	$10^3 \Omega$	$10^3 \Omega$
2,8	6	9,7	4,8	9,7
11,0	7	3,5	1,7	3,5
55,0	8	1,7	0,9	1,7
132,0	8	0,8	0,4	0,8

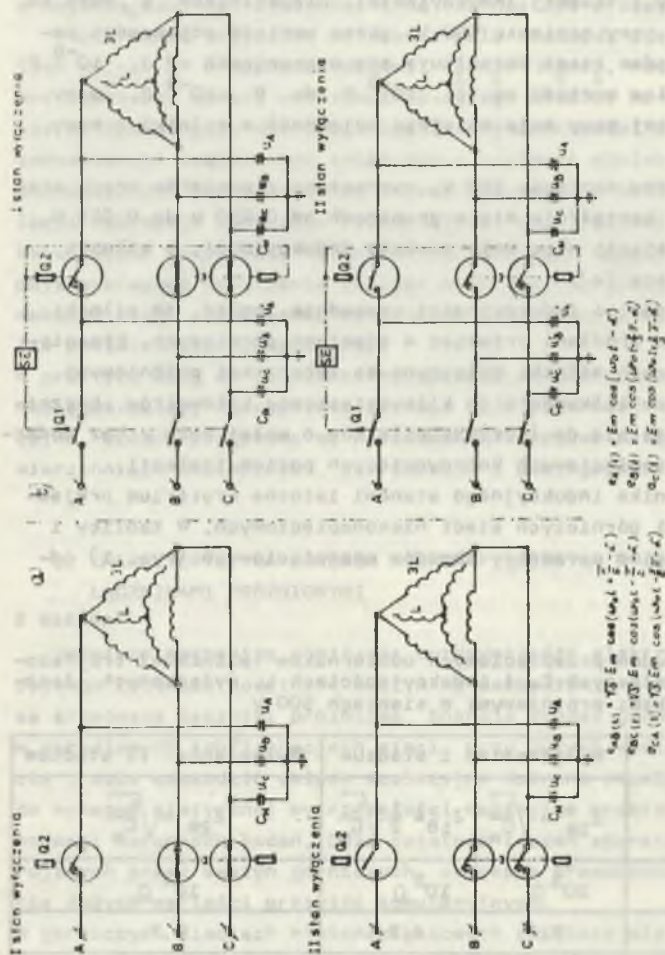


Fig. 1. Obwód elektryczny z odbiornikiem trójfazowym indukcyjnym L skojarzonym w gwiazde o pojemnościach własnych odbiornika  $C_w$  i linii zasilającej  $C_p$ , trójbiegunowym łącznikiem magnetycznym  $Q_1$ , kombinacyjnym łącznikiem próznowym  $Q_2$ , umożliwiającym niezależne wyłączenie prądu trójfazowego w kolejnych fazach, oraz sterownikiem impulsowym SE. realizującym sterowanie i programowanie sekwencji łączeniowych

Fig. 1. The circuit with inductive L three-phase receiver in star configuration with its capacitance  $C_w$  and power supply line capacitance  $C_p$ , three-pole magnetic blow-out switch  $Q_1$ , the vacuum switch  $Q_2$  enabling the independent switching off the three-phase current in successive phases and pulse controller SE, controlling end programming time distances between switching sequences

biorników trójfazowych o pojemności własnej  $C_w$  i indukcyjności  $L$ , wyłączanych łącznikami próżniowymi - dla podstawowego zakresu mocy silników elektrycznych stosowanych w górniczych sieciach niskonapięciowych 500 V (przy założeniu warunków ekstremalnych - braku w tych obwodach pojemności linii zasilającej  $C_p$ ) i założeniach upraszczających model sieci oraz warunki początkowe przebiegu wyłączenia prądu obciążenia silnika. Założenia te przedstawiono w rozdziale 5. Podane moce  $P_n$  są reprezentatywne dla silników instalowanych w sieciach o napięciu 500 V. Stosownie do wyników teoretycznych analiz, pulsacja własna  $\omega = 2\pi f$  jest jednakowa w poszczególnych obwodach dla pierwszego (I) i drugiego (II) stadium wyłączenia prądów w sieci trójfazowej (rozd. 7). Przeciętne częstotliwości własne ( $f$ ) wyłączanych obwodów w sieci 500 V zawierają się w granicach 6-8 kHz.

Dla silników "najmniejszych mocy" impedancje charakterystyczne ( $Z_{1A}$ ,  $Z_{1B} = Z_{1C}$ ,  $Z_{2B} = Z_{2C}$ ) są ponad 10-krotnie większe niż dla silników o "największych mocach". W tym też stosunku kształtują się generowane łącznikami próżniowymi przepięcia w tych obwodach.

Obecność w sieci pojemności  $C_p$  związanych z przewodami i kablami linii zasilającej wpływa w sposób istotny na parametry obwodów przepięciowych, zmniejszając częstotliwości i wartości amplitud przepięć. Należy jednak stwierdzić, że przy określonych sekwencjach łączeniowych, właściwych górniczym sieciom niskonapięciowym energia pola elektrycznego zawarta w pojemnościach linii zasilającej  $C_p$  może być źródłem napięcia swobodnego i przepięć, generowanych przez manewrowe łączniki próżniowe, o dużych wartościach.

#### 4. PRĄD UCIECIA JAKO KRYTERIUM WYŁĄCZANIA OBWODÓW INDUKCYJNYCH ŁĄCZNIKAMI PRÓŻNIOWYMI

Skłonność łączników próżniowych do "uciania" prądu w okolicach naturalnego przejścia przez zero, związana z ich manewrowymi warunkami pracy i dużą częstością łączeń, nakłada określone wymagania dla projektowania i eksploatacji. Dlatego istnieje potrzeba zdefiniowania prądu "ucięcia" jako parametru charakterystycznego, pozwalającego prognozować zakres oddziaływania łączników próżniowych na napięcia w sieci i podejmować skuteczne zabezpieczenia przepięciowe. Prąd "ucięcia" jest zmienną losową dającą się aprobksymować rozkładom teoretycznym normalnym.

W wyniku prac normalizacyjnych w tym zakresie [2] podjęto próbę zdefiniowania prądu "ucięcia", metod badań i obwodu probierczego. Badania prądów "ucięcia" wykonywano na przestrzeni ostatnich lat w różnych układach probierczych, zarówno dla łączników nowych z produkcji seryjnej, jak i eksploatowanych, głównie produkcji krajowej (typu SV-5, SV-7, SV-8).

Analiza wyników pozwala sformułować kilka istotnych dla projektowania i eksploatacji wniosków.



Wartość maksymalna prądu "ucięcia" jest zbliżona do wartości średnich minimalnego prądu stabilnego palenia się łuku i znacznie odbiega od wartości prądu "ucięcia" podawanej w kartach katalogowych łączników próżniowych i przyjmowanej dla projektowania zabezpieczeń.

W tabelicy 2 podano przykład wyników badań prądów "ucięcia" (wartości średnie  $\bar{I}$ , największe  $I_{max}$  i odchylenia standardowe  $\sigma$ ) zdefiniowanych jako prąd "ucięcia" górny  $I_{Umax}$ , prąd "ucięcia" dolny  $I_{Umin}$  i minimalny prąd stabilnego palenia się łuku  $I_{min}$  [2].

Tabela 2

Wyniki badań prądów "ucięcia" styczników próżniowych typu SV-5, SV-7 i SV-8

Typ stycznika	$I_{Umax}$			$I_{Umin}$			$I_{min}$		
	$\bar{I}$	$\sigma$	$I_{max}$	$\bar{I}$	$\sigma$	$I_{max}$	$\bar{I}$	$\sigma$	$I_{max}$
-	A	-	A	A	-	A	A	-	A
SV-5	5,4	1,77	11,0	1,5	0,94	4,5	11,2	1,7	14,8
SV-7	5,6	1,96	11,9	1,7	1,09	5,2	11,8	1,33	14,1
SV-8	5,9	1,86	11,8	1,9	1,10	5,4	12,8	1,79	15,6

Z porównania podanych wartości wyznaczonych w obwodach o różnych parametrach wynika, że w zależności od układu pomiarowego i metody, otrzymuje się różne wartości prądu "ucięcia". Uzasadnia to konieczność przyjęcia jednolitych wymagań, metod badań, układu pomiarowego i znormalizowania wartości parametrów prądu "ucięcia". Wartości prądów "ucięcia" różnie zdefiniowane, mierzone różnymi metodami i w różnych układach pomiarowych, z reguły nie są wyższe od największej wartości minimalnego prądu stabilnego palenia się łuku. Wartość ta może być uznana za maksymalną, do której asymptotycznie zbliżają się rzeczywiste wartości prądów "ucięcia" i przyjęta za podstawę w projektowaniu ochrony przebiegowej, w oparciu o dezyderat techniczny, by przepięcia komutacyjne nie przekroczyły napięć pobierczych izolacji maszyn i urządzeń.

W szczególnych warunkach układowych i sekwencji łączeniowych, łączniki próżniowe (z uwagi na dużą wytrzymałość przerwy zestykowej i szybkość otwierania) mogą przerywać prądy wynikające z napięć swobodnych, których źródłem jest energia pola elektrycznego zawarta w pojemnościach linii, nawet przy wartościach szczytowych. Generowane wówczas wartości przepięć najczęściej nie przekraczają wytrzymałości elektrycznej przerwy zestykowej, natomiast może wówczas dojść do wyładowania zupełnego w słabszych izolacyjnie punktach sieci.



## 5. ZAŁOŻENIA ANALIZY PRZEBIEGÓW NAPIĘCIOWYCH W OBWODACH WYŁĄCZANYCH ŁĄCZNIKAMI PRÓŻNIOWYMI

W rozdziale podano ogólne założenia przybliżonej analizy przebiegów napięć, generowanych w obwodach indukcyjnych jednofazowych i trójfazowych przez łączniki próżniowe wskutek wymuszonego "ucinania" prądu łuku w okolicach przejścia przez zero i "ucinania" prądu w obwodach z napięciami swobodnymi w warunkach transpozycji sekwencji łączeniowych, przy współpracy z łącznikami powietrznymi normalnociśnieniowymi. Dokonano przy tym następujących założeń upraszczających.

1. Stała tłumienia równa się zero. Warunek ten spełniają obwody o bardzo małej rezystancji i małej pojemności. Energia przebiegowa zawarta w polu magnetycznym cewek o indukcyjności  $L$  obwodu jest w całości zamieniona na energię pola elektrycznego w pojemnościach sieci  $C$ . Straty energii wydzielone w postaci ciepła na rezystancjach ładowania pojemności sieci nie istnieją i wobec tego rezystancje szeregowo mogą być w analizie obwodów pominięte.

Założenie jest dopuszczalne dla analizy wartości amplitudy pierwszego półokresu przebiegu napięcia po wyłączeniu prądu obciążenia łącznikiem próżniowym.

2. Model analityczny silnika klatkowego nie uwzględnia tłumiącego działania klatki wirnika, strat w żelazie i zakłada przebieg napięć na zaciskach liniowego obwodu bez sprzężeń indukcyjnych.

Wstępne badania obwodów rzeczywistych, wartości amplitud i rozkładu napięć generowanych przez łączniki próżniowe wykazują małe różnice mierzonych wartości przepięć w stosunku do wartości wynikających z przyjętego modelu. O ile dalsze badania potwierdzą dotychczasowe spostrzeżenia, upraszczający analizę teoretyczną model mógłby być wykorzystany dla obliczania wartości przepięć w różnych spotykanych w praktyce obwodach elektrycznych - w projektowaniu i eksploatacji sieci górniczych z łącznikami próżniowymi.

3. Źródłem energii w obwodach, w których łączniki próżniowe wyłączają prądy w warunkach transpozycji sekwencji łączeniowych, jest pole elektryczne. Energia zawarta w polu magnetycznym jest równa zero.

Założenie to dotyczy szeregowego połączenia łącznika magnetowdmuchowego (wyłączającego prądy obciążenia przy sterowaniu zabezpieczeniowym) z łącznikiem próżniowym. Przesunięcie łącznika próżniowego w tych warunkach zostaje w czasie przesunięte (po wyłączeniu prądów obciążenia odbiornika) do obwodów z napięciami swobodnymi.

4. Indukcyjności szeregowo rozłożone linii zasilającej i odbiorczej, z uwagi na krótkie odcinki kabli i przewodów sieci górniczej, są bardzo małe. Sieć ma wyłącznie parametry skupione LC.

5. W układzie trójfazowym w warunkach wymuszonego gaszenia łuku przed przejściem prądu przez zero występują dwa stany wyłączania prądów obciążenia łącznikiem próżniowym, uwzględniające komutację sieciową. Łuk gaśnie w przerwie zestykowej zawsze w okolicach pierwszego przejścia prądu przez zero w każdej fazie.

I stan stanowią warunki po wyłączeniu prądu w jednej fazie. Łuk gaśnie w przerwie zestykowej w pobliżu pierwszego przejścia prądu przez zero w biegunie łącznika.

II stan stanowią warunki po zrównoważeniu układu jednofazowego i wyłączeniu prądu obciążenia w pozostałych dwóch fazach. Łuk gaśnie w przerwie zestykowej równocześnie w obu biegunach w pobliżu kolejnego pierwszego przejścia prądu przez zero.

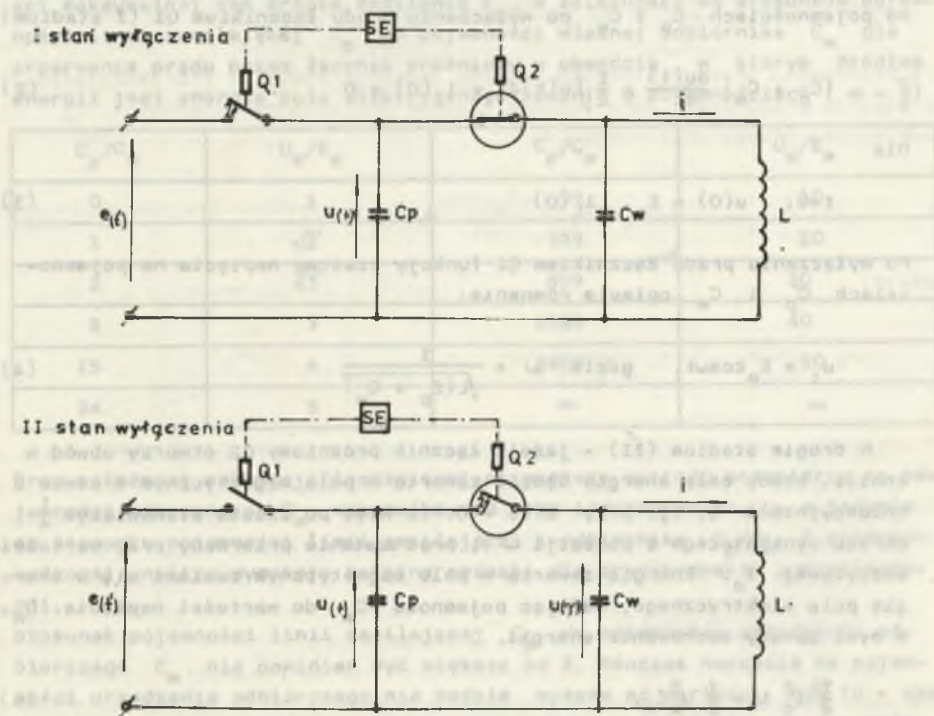
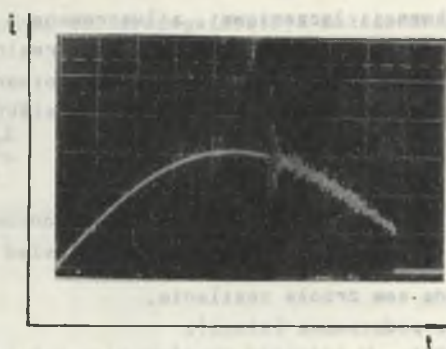
Pominięto warunki przejściowe między stanem I a stanem II, wynikające z nierównoczesności otwierania styków oraz wpływ przebiegu napięć stanu I na warunki wyłączania prądów w zrównoważonym układzie jednofazowym i na przebiegi napięć stanu II.

#### 6. PRZEPIĘCIA KOMUTACYJNE W WARUNKACH TRANSPOZYCJI SEKWENCJI ŁĄCZENIOWYCH

Konfiguracja górniczej sieci niskonapięciowej stanowi w elementarnej postaci szeregowo połączenie stacji transformatorowej, odbiornika, wyłącznika zabezpieczeniowego magnetowdmuchowego lub ogranicznika i łącznika manewrowego próżniowego - ze zwarciovą wzdłużną koordynacją zabezpieczeń. Wyłączenie prądu przez ogranicznik lub wyłącznik zabezpieczeniowy spowoduje, że łącznik manewrowy próżniowy w wyniku współdziałania zabezpieczeń zwarciovych lub zaniku napięcia będzie przerywał obwód, w którym źródłem energii jest energia pola elektrycznego zawarta w pojemnościach. Powstaje obwód oscylacyjny LC składający się z naładowanych pojemności linii, odbiornika, indukcyjności odbiornika i łącznika próżniowego. W przypadku, gdy otwarcie obwodu łącznikiem próżniowym nastąpi przy wartości szczytowej prądu lub w jego okolicach, a mała wartość napięcia nie spowoduje zapalenia łuku, to powracająca wytrzymałość przerwy zestykowej w próżni uniemożliwi najczęściej jej przebicie pojawiającym się udarem napięciowym. Na pojemności odbiornika powstanie przepięcie, którego wartość będzie zależna od warunków początkowych i parametrów obwodu. Zdarza się również, że wskutek "ucięcia" prądu energia źródeł generujących przepięcia jest tak duża, że następuje przebicie przerwy zestykowej łącznika po upływie dłuższego czasu od wyłączenia prądu obciążenia. W określonych sytuacjach może więc powstać zagrożenie rażeniowe, pożarowe i wybuchowe.

Na rys. 2 przedstawiono obwód jednofazowy z pojemnością linii zasilającej  $C_p$ , odbiornikiem o indukcyjności  $L$  i o pojemności  $C_w$ , w którym





Rys. 2. Obwód elektryczny z jednofazowym odbiornikiem indukcyjnym  $L$  o pojemności własnej odbiornika  $C_w$  i linii zasilającej  $C_p$  z jednobiegunowym łącznikiem powietrznym normalnościeniowym  $Q_1$ , jednobiegunowym łącznikiem próżniowym  $Q_2$  i sterownikiem impulsowym  $SE$  programowania sekwencji łączeniowych

Fig. 2. Circuit with inductive single-phase receiver  $L$  with receiver capacitance  $C_w$ , power supply line  $C_p$  with single-pole air magnetic blow-out switch  $Q_1$ , single-pole vacuum switch  $Q_2$  and pulse controller  $SE$  for programming the time distances between switching sequences

transpozycję sekwencji łączeniowej, zilustrowaną w dwóch kolejnych stadiach I i II, odwzorowując łącznik powietrzny normalno ciśnieniowy Q1 połączony z łącznikiem próżniowym Q2 o opóźnionym otwarciu względem łącznika Q1. W obwodzie popłynie prąd pod wpływem siły elektromotorycznej źródła zasilania

$$e(t) = E_m \cos \omega_0 t, \quad (1)$$

gdzie:

$E_m$  - amplituda sem źródła zasilania,

$\omega_0$  - pulsacja podstawowa (sieci).

Z równań rozplywu prądów wyznaczona zostaje funkcja czasowa napięcia  $u(t)$  na pojemnościach  $C_p$  i  $C_w$  po wyłączeniu prądu łącznikiem Q1 (I stadium)

$$(C_p + C_w) \frac{du(t)}{dt} + \frac{1}{L} \int u(t) dt + i_L(0) = 0 \quad (2)$$

Ola

$$t=0; \quad u(0) = E_m, \quad i_L(0) \quad (3)$$

Po wyłączeniu prądu łącznikiem Q1 funkcję czasową napięcia na pojemnościach  $C_p$  i  $C_w$  opisuje równanie:

$$u_t = E_m \cos \omega t, \quad \text{gdzie } \omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_p + C_w)}} \quad (4)$$

W drugim stadium (II) - jeżeli łącznik próżniowy Q2 otworzy obwód w chwili, kiedy cała energia będzie zawarta w polu magnetycznym w cewce o indukcyjności  $L$ , tj. przy  $u(t) = 0$  (a więc po czasie stanowiącym  $\frac{1}{4}$  okresu wynikającego z pulsacji  $\omega$ ), prąd zostanie przerwany przy wartości szczytowej  $I_0$ . Energia zawarta w polu magnetycznym zamieni się w energię pola elektrycznego, ładując pojemność  $C_m$  do wartości napięcia  $U_m$ , w myśl zasady zachowania energii.

$$\frac{1}{2} I_0^2 L = \frac{1}{2} U_m^2 C_w, \quad (5)$$

gdzie:

$$I_0 = \frac{E_m}{\omega L}, \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_p + C_w)}}$$

stad

$$U_m = E_m \sqrt{1 + \frac{C_p}{C_w}} \quad (6)$$



Pojemność  $C_w$  urządzenia odbiorczego zostaje naładowana do maksymalnego napięcia

$$U_m = E_m \sqrt{1 + \frac{C_p}{C_w}} \quad (7)$$

W tabelicy 3 zestawiono zmiany maksymalnych napięć na pojemności własnej odbiornika  $C_w$ , w zależności od pojemności linii zasilającej  $C_p$ .

Tabela 3

Charakterystyczne wartości maksymalnych przebiegów  $U_m$  odniesione do wartości maksymalnej sem źródła zasilania  $E_m$ , w zależności od stosunków pojemności linii zasilającej  $C_p$  do pojemności własnej odbiornika  $C_w$  dla przerwania prądu przez łącznik próżniowy w obwodzie, w którym źródłem energii jest energia pola elektrycznego zawarta w pojemnościach ( $\alpha = \frac{\pi}{2}$ )

$C_p/C_w$	$U_m/E_m$	$C_p/C_w$	$U_m/E_m$
0	1	99	10
1	$\sqrt{2}$	399	20
2	$\sqrt{3}$	899	30
8	3	1599	40
15	4	2499	50
24	5	$\infty$	$\infty$

Przy założonej sekwencji łączeniowej największa wartość przebiegu na pojemności odbiornika  $C_w$  nie zależy od jego indukcyjności  $L$ , a jedynie od stosunku pojemności linii zasilającej i odbiornika  $C_p/C_w$ . Z przeprowadzonej analizy wynikają istotne wnioski dla projektowania i eksploatacji.

Stosunek pojemności linii zasilającej  $C_p$  do pojemności urządzenia odbiorczego  $C_w$  nie powinien być większy od 2. Wówczas napięcie na pojemności urządzenia odbiorczego nie będzie wyższe od wartości  $U\sqrt{6}$  ( $U$  - wartość skuteczna napięcia znamionowego sieci) i spełniony zostanie podstawowy dezyderat techniczny, dotyczący napięć probierczych izolacji.

Przeprowadzoną analizę można zweryfikować rozwiązując równanie dla dowolnej chwili otwarcia łącznika próżniowego Q2 i "ucięcia" prądu przy kącie  $\alpha$  przed przejściem przez zero.

Przebieg napięcia na pojemnościach  $C_p$  i  $C_w$  przed otwarciem łącznika próżniowego Q2 opisuje równanie:

$$u_t = E_m \cos(\omega t - \alpha). \quad (8)$$

Funkcja czasowa napięcia  $u_\tau$  na pojemności urządzenia odbiorczego  $C_w$  po wyłączeniu prądu łącznikiem Q2 zostaje wyznaczona z równania (9), przy czym argument  $\tau$  reprezentuje nową skalę czasu

$$C_w \frac{du_\tau}{d\tau} + \frac{1}{L} \int u_\tau d\tau = 0 \quad (9)$$

Warunki początkowe:

$$u(0) = E_m \cos \alpha \quad (10)$$

$$i_L(0) = - \frac{E_m \sin \alpha}{\omega}$$

Po przerwaniu prądu łącznikiem Q2 przy dowolnym kącie  $\alpha$  poprzedzającym przejście prądu przez zero funkcję czasową napięcia na pojemności  $C_w$  odbiornika przedstawia równanie:

$$u(\tau) = E_m \cos \alpha \cos \omega_1 \tau + \sqrt{\frac{L}{C_w}} \frac{E_m \sin \alpha}{\omega L} \sin \omega_1 \tau \quad (11)$$

gdzie:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC_w}}, \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_p + C_w)}}$$

W przypadku, gdy przerwanie prądu nastąpi przy wartości szczytowej, tj. dla  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , napięcie na pojemności odbiornika  $C_w$  będzie zależało wyłącznie od energii zawartej w polu magnetycznym cewki o indukcyjności  $L$  i przebiegać będzie według zależności:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{L}{C_w}} \frac{E_m}{\omega L} \sin \omega_1 \tau. \quad (12)$$

Wartość maksymalna napięcia w obwodzie wystąpi dla

$$\omega_1 \tau = \frac{\pi}{2}$$

i wyniesie:

$$U_n = E_m \sqrt{1 + \frac{C_p}{C_w}}$$



Identyczne równania otrzymano analizując obwód przy przerwaniu wartości szczytowej prądu łącznikiem próżniowym Q2 w oparciu o zasadę zachowania energii.

W przypadku przerwania prądu w obwodzie łącznikiem próżniowym Q2. przy dowolnym innym kącie  $\alpha$  poprzedzającym przejście przez zero, wartość maksymalna napięcia w obwodzie będzie zawsze mniejsza od wyznaczonej dla kąta  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ .

Wartość maksymalna napięcia  $U_{m\alpha}$  będzie zależęć od sumy energii zawartej w polu elektrycznym pojemności  $C_w$  i w polu magnetycznym cewki o indukcyjności  $L$  w chwili przerwania prądu przy kącie  $\alpha$ .

Gdy  $\alpha < \frac{\pi}{2}$  suma energii pola elektrycznego zawartej w pojemności  $C_w$  i energii pola magnetycznego zawartej w cewce o indukcyjności  $L$  będzie mniejsza od energii w przypadku przerwania prądu przy kącie  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  - o wartość energii pozostałej w polu elektrycznym pojemności linii zasilającej  $C_p$ . Stąd

$$U_{m\alpha} < E_m \sqrt{1 + \frac{C_p}{C_w}} \quad (13)$$

Maksymalna wartość napięcia w tych przypadkach wynosi:

$$U_{m\alpha} = E_m \cos\alpha \cos \left[ \arctg \left( \frac{\omega L}{\omega} \operatorname{tg}\alpha \right) \right] + \sqrt{\frac{L}{C_w}} \frac{E_m \sin\alpha}{\omega L} \sin \left[ \arctg \left( \frac{\omega L}{\omega} \operatorname{tg}\alpha \right) \right] \quad (14)$$

W ogólnym przypadku, równanie opisujące przebieg napięcia na pojemności odbiornika zawiera dwa składniki: jeden wynikający z energii zawartej w indukcyjności, drugi z energii zawartej w pojemnościach obwodu. Oba te składniki w różny sposób decydują o wartości przepięcia. Pierwszy jest iloczynem impedancji ( $\sqrt{\frac{L}{C}}$ ) obwodu i prądu "ucięcia", drugi natomiast składnik zależy od wartości napięcia  $E_m \cos\alpha$ , do której naładowane były pojemności  $C_p$  i  $C_w$ , przy wyłączeniu prądu.

Z analizy i rozważań wpływu tych składników na wartość generowanego przepięcia wynika kolejny postulat techniczny dla projektowania i eksploatacji górniczych sieci niskonapięciowych, w szczególności dotyczący szeregowego łączenia łączników i ich sekwencji łączeniowych w warunkach zabezpieczeniowych i manewrowych.

Problem wymaga dalszych badań dla ustalenia kryteriów projektowania, które uwzględnią rzeczywiste w tym zakresie potrzeby wynikające z rozkładów statystycznych i współczynników korelacji przepięć występujących w różnych rejonach sieci trójfazowej.

## 7. PRZEPIĘCIA KOMUTACYJNE W OBWODACH INDUKCYJNYCH TRÓJFAZOWYCH SKŁADZONYCH W GWIAZDĘ

Zjawiska przepięciowe w sieci trójfazowej mają bardziej złożony charakter niż w obwodach jednofazowych. Indukcyjności i pojemności fazowe są wzajemnie skojarzone, co ma istotny wpływ na przebieg napięć w obwodach wyłączanych łącznikami próżniowymi.

W oparciu o podane w rozdz. 5 założenia, w układzie trójfazowym można wyróżnić dwa stany charakterystyczne wyłączania prądów roboczych silnika.

Pierwszy stan charakterystyczny (I) występuje po zgaszeniu łuku zestykowego w jednym biegunie łącznika i wyłączeniu prądu trójfazowego.

Drugi stan charakterystyczny (II) występuje po zrównoważeniu układu, zgaszeniu łuku zestykowego w obu biegunach łącznika i wyłączeniu prądu jednofazowego.

Na rys. 1 przedstawiono schematy ideowe obrazujące charakterystyczne stany wyłączania prądów roboczych układu trójfazowego.

Przy założeniu, że łuk łączeniowy w łącznikach próżniowych gaśnie przy kącie  $\alpha$  poprzedzającym naturalne przejście prądu przez zero w każdej fazie układu trójfazowego, w obwodach fazowych będą generowane przepięcia łączeniowe zależne od energii pola magnetycznego zawartej w cewkach, energii pola elektrycznego zawartej w pojemnościach obwodu, napięcia zasilania oraz od pojemności linii zasilającej  $C_p$  i pojemności odbiornika  $C_w$ . W przypadku, gdy pojemność linii zasilającej jest bardzo mała lub równa zero, przy uwzględnieniu podanych w rozdz. 5 ograniczeń, przebiegi napięć na pojemnościach fazowych można obliczyć z odpowiednich równań dla I i II stanu wyłączenia prądów roboczych (rys. 1a).

Obliczone impedancje i pulsacje własne obwodów zestawiono w tabelicy 4.

Tabela 4

Zestawienie impedancji  $Z$  i pulsacji własnych  $\omega$  dla obwodów przepięciowych trójfazowego odbiornika oraz pierwszego (I) i drugiego (II) stanu wyłączenia prądu trójfazowego (dla pojemności linii zasilającej  $C_p = 0$ )

Wyłączenie I - stan	$Z_{1A}$	$Z_{1B} = Z_{1C}$	$\omega_{1A} = \omega_{1B} = \omega_{1C}$	
	$\sqrt{\frac{L}{C_w}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C_w}}$	$\sqrt{\frac{1}{LC_w}}$	
Wyłączenie II - stan	$Z_{2A}$	$Z_{2B} = Z_{2C}$	$\omega_{2A}$	$\omega_{2B} = \omega_{2C}$
	0	$\sqrt{\frac{L}{C_w}}$	0	$\sqrt{\frac{1}{LC_w}}$



Pulsacje własne w poszczególnych fazach są jednakowe, impedancje charakterystyczne różnią się dla I stanu wyłączania w stosunku  $Z_{1B} = Z_{1C} = \frac{1}{2} Z_{1A}$ .

Pojemności linii zasilającej  $C_p$  wpływają tłumiąco na amplitudy przebiegów napięć w poszczególnych fazach, w których prądy robocze są wyłączane łącznikami próżniowymi. Z analizy wykonanych badań wynika, że po wyłączeniu prądu trójfazowego w jednej fazie niezależnie od wartości pojemności linii zasilającej  $C_p$  pojawiają się przebiecia również w fazach pozostałych.

Znaczne różnice występują w zakresie częstotliwości przebiegów przebieciowych w poszczególnych fazach w zależności od pojemności linii zasilającej. W przypadku, gdy pojemność linii zasilającej  $C_p = 0$ , częstotliwość we wszystkich fazach A, B, C jest w przybliżeniu taka sama.

W przypadku, gdy pojemność linii zasilającej  $C_p > 0$ , częstotliwości faz drugiej (B) i trzeciej (C) są znacznie wyższe od częstotliwości fazy pierwszej (A). Pojemności linii zasilającej  $C_p$  nie mają istotnego wpływu na wzrost amplitud napięć generowanych przez łączniki próżniowe w poszczególnych fazach, przy wyłączaniu prądów roboczych, mają natomiast zasadniczy wpływ na wartość przebiec generowanych przez łączniki próżniowe, przy przerywaniu obwodów z przebiegami napięć swobodnych. Schemat ideowy fizycznego modelu obwodu trójfazowego charakterystycznego dla niskonapięciowych sieci górniczych z połączonymi szeregowo łącznikami magnetowdmuchowymi i łącznikiem próżniowym oraz silnikiem indukcyjnym klatkowym, przedstawia rys. 1b. Źródłem energii przebiegu napięć swobodnych w tym obwodzie bez sprzężeń indukcyjnych jest energia pola elektrycznego zawarta w pojemności obwodu  $C_p + C_w$  po wyłączeniu prądów roboczych przez łącznik magnetowdmuchowy Q1. Wyłączenie rozpatrywanego obwodu przez łącznik próżniowy Q2 może nastąpić w dowolnej chwili, w tym również przy wartości szczytowej prądu. Przebiecia generowane przez łącznik próżniowy wytworzone na pojemności własnej  $C_w$  będą zależęć od energii pola elektrycznego zawartej w pojemnościach obwodu  $C_p + C_w$  i wartości prądu "ucięcia".

Problem nie został jeszcze opracowany teoretycznie. Badania obejmują przypadki wyłączania obwodów w całym zakresie zmian prądu od naturalnego przejścia przez zero do "ucięcia" prądu przy wartości szczytowej. Wyniki eksperymentalne potwierdzają zgodność opracowanych cząstkowych analiz teoretycznych.

Analiza wyników badań nasuwa konkretne wnioski w zakresie optymalizacji prędkości i nierównoczesności otwierania styków łączników próżniowych. Przesunięcie w czasie drugiego stanu wyłączania prądów roboczych względem stanu pierwszego pozwoli uniknąć przerywania prądów wysokiej częstotliwości i generowania jeszcze wyższych napięć. Optymalizacja prędkości otwierania styków łączników próżniowych zapewni powtórne zapłony w biegunowej przerwie zestykowej w przypadku ucinania prądów w okolicach wartości szczytowej, zwłaszcza w obwodach z napięciami swobodnymi. Prawdopodobień-

stwo uszkodzenia izolacji sieci może być w ten sposób znacznie zmniejszone, niezależnie od energii źródeł generujących przebiecia.

## 8. ZAKOŃCZENIE

Przebiecia generowane łącznikami próżniowymi osiągają znaczne wartości szczytowe od strony zasilania i urządzeń odbiorczych oraz między poszczególnymi fazami. Występują między nimi określone związki wyrażone współczynnikami korelacji. Mogą być one wyznaczone na podstawie odpowiednich badań fizycznych i statystycznych. Badania w sieci rzeczywistej pozwalają uzyskać charakterystyczny wskaźnik współczynników korelacji górniczej sieci niskonapięciowej - niezbędny do prognozowania ochrony przebieciowej i optymalizacji pracy aparatury łączeniowej. Jednym z kryteriów oceny zagrożeń elektrycznych może być bowiem energia przebiec komutacyjnych. Badania rozkładów statystycznych energii przebiec stanowią integralną część prac w zakresie kryteriów projektowania i eksploatacji kopalnianych sieci oddziałowych z łącznikami próżniowymi.

Opisane skrótko w pracy mechanizmy generowania przebiec w sieciach elektroenergetycznych z łącznikami próżniowymi, z uwzględnieniem wpływu napięć udarowych na wytrzymałość elektryczną izolacji silników oraz próby oceny tych zjawisk stwarzają techniczne przesłanki stosowania zabezpieczeń przebieciowych. Kompleksowa ochrona przebieciowa, obejmująca urządzenia zasilające i odbiorcze, może mieć istotne znaczenie dla profilaktyki w zakresie zwarć doziemnych, międzyzwojowych i międzyfazowych oraz dla trwałości izolacji i niezawodności maszyn i urządzeń elektrycznych górniczych.

W szczególnych przypadkach konfiguracji sieci kopalnianych mogą wystąpić przebiecia o większej wartości szczytowej niż to wynika z analiz w warunkach pracy manewrowej łączników próżniowych. Wymagać to będzie odpowiedniego korygowania pojemności doziemnej - odcinkami przewodów sieci zasilającej i odbiorczej. Mogą też występować wyładowania (przebiecia) w przerwach zestykowych po wyłączeniu obciążenia, bądź trwałe uszkodzenia przyrządów, półprzewodników. Wymaga to dalszych badań.

## LITERATURA

- [1] Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1984.
- [2] Frączek F.: Przebiecia generowane łącznikami próżniowymi i sposoby ich ograniczania. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 29. Poznań 1985.
- [3] Kowalski Z.: Przebiecia spowodowane łącznikami próżniowymi w górniczych sieciach niskonapięciowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1979, nr 5/126.



- [4] EMAG: Badania łączeniowych stanów przejściowych i ograniczenia energii w miejscu zwarcia. Praca badawcza nr 01.5.10.12.07. Katowice 1985.
- [5] EMAG: Urządzenia ograniczania poziomu przepięć w sieciach kopalnianych do 1 kV. Praca badawcza nr 1.2.1.56.01, Katowice 1986.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy ZYGMUNT

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1987 r.

#### КРИТЕРИИ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВАКУУМНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ В ГОРНЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ

#### Резюме

В работе проведен анализ нарушения изоляции машин вызванных перенапряжениями при применении вакуумных соединителей. Показано на большой разброс характеристических показателей цепи и токов среза в горных низковольтных сетях, а также их влияние на показатели коммутационных перенапряжений. Проведен анализ токов среза вакуумных соединителей, а также фазовых индуктивностей и емкостей электрических двигателей приводов горных машин. Доказано, что вакуумные соединители не должны применяться для соединения двигателей небольшой мощности в условиях изменчивости конфигурировки сетей без защиты от перенапряжений, координирующей степень изоляции. Проведен анализ характеристического для горных сетей способа соединения в однофазной индуктивной цепи — последовательного присоединения магнетовыдувающих и вакуумных соединителей, представлен алгоритм расчета перенапряжений в данных условиях. Доказано, что максимальная величина перенапряжения на приемнике которого цепь разорвана вакуумным соединителем уже после отключения тока нагрузки не зависит от индуктивности приемника, а только от отношения емкости линии снабжения и приемника. В этом смысле проведен анализ условий оптимизации параметров сети. Представлены исходные выражения для анализа перенапряжений в условиях транспозиции соединительных последовательностей в трехфазных сетях с вакуумными соединителями.

#### METHODS OF OVERVOLTAGE PROTECTION FOR VACUUM SWITCHES APPLICATION IN UNDERGROUND LOW-VOLTAGE LINES

#### Summary

There were analysed the principles of machines isolation failures due to overvoltages caused by application of vacuum switches. There was pointed out the large dispersion of circuit parameters and chopped currents



in underground low-voltage lines and their influence on values of commutation overvoltages. Chopped currents of vacuum switches and phase induction and capacitance of motors driving the mines machines were analysed. It has been proved that vacuum switches can be used for switching low power motors in lines with variable configurations without arresters determining isolation level. It was analysed the typical for underground lines switching system in single phase inductive circuit that is vacuum and magnetic blow-out switches connected in series. It was given the algorithm for calculating the overvoltage in such conditions. It was proved, that maximum overvoltage appearing on receiver which circuit is switched off just after switching off the output current, does not depend on the receiver indication but only on ratio of power supply line capacitance to the capacitance of the receiver. Hence, there were analysed the conditions of lines parameters optimization. The equations for analysis of overvoltages under transposition of switching sequence in three phase lines with vacuum switches were derived.

Wpływ przebiegów prądów przerywanych i pojemności indukcyjnych na wartości nadwyżek napięć przy wyłączeniu odbiorników w sieciach niskiego napięcia. Wykazano, że wyłączniki próżniowe mogą być używane do wyłączenia odbiorników o małej mocy w liniach o zmiennej konfiguracji bez konieczności stosowania ograniczników napięcia. Przeanalizowano typowy dla linii podziemnych układ przełączania w obwodzie jednofazowym indukcyjnym, w którym wyłącznik próżniowy i wyłącznik z wyładowaniem magnetycznym są połączone szeregowo. Podano algorytm do obliczenia nadwyżki napięcia w takich warunkach. Wykazano, że maksymalna nadwyżka napięcia pojawiająca się na odbiorniku, który jest wyłączany tuż po wyłączeniu prądu wyjściowego, nie zależy od wskazań odbiornika, lecz tylko od stosunku pojemności linii zasilającej do pojemności odbiornika. Dlatego przeanalizowano warunki optymalizacji parametrów linii. Wywiedziono równania do analizy nadwyżek napięć przy transpozycji sekwencji przełączania w liniach trójfazowych z wyłącznikami próżniowymi.