

Florien KRASUCKI

Roman PILORZ

### PROBLEMY ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH W WARUNKACH PRZEBIEGÓW ODKSZTAŁCONYCH

**Streszczenie.** W przemyśle wydobywczym coraz szersze zastosowanie znajdują urządzenia energoelektroniczne, służące do przekształcania i sterowania przepływem energii elektrycznej oraz dopasowania jej postaci do odpowiednich odbiorów.

Przy powszechnym stosowaniu tych urządzeń w górnictwie istotny będzie problem odkształconych przebiegów prądu i napięcia, powodujący między innymi zakłócenia w pracy zabezpieczeń stosowanych w sieci kopalnianej.

Wykazano, że stosując układy przekształtnikowe typu falownikowe- go małej mocy do zasilania maszyn i urządzeń górniczych, należy uwzględnić fakt znacznego odkształcenia i dużych wartości prądu doziemienia w sieci zasilanej z tych układów. Całkowita wartość tego prądu (przy doziemieniu metalicznym  $R_0 = 0$ ) określona zależno- ścią:

$$I_z = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_z^2(n)},$$

gdzie

$$I_z(n) = 3U_f(n) \sqrt{\frac{1}{R^2} + (n\omega C)^2}$$

zależy od wartości wszystkich harmonicznych ( $n$ ) występujących w przebiegach napięcia fazowego na wyjściu falownika  $U_f(n)$  oraz od rezystancji  $R$  i pojemności fazowej  $C$  sieci względem ziemi.

Stwierdzono, że, w przypadku gdy prąd doziemienia zawiera widmo wyższych harmonicznych, dotychczas stosowane zabezpieczenia upływo- we nie spełniają swoich zadań ze względu na brak możliwości kompen- sacji składowej pojemnościowej tego prądu. W związku z tym zachodzi konieczność opracowania nowych metod kontroli stanu izolacji. W opracowaniu przedstawiono propozycję sposobu kontroli stanu izo- lacji, dostosowaną do nowych warunków zasilania.

#### 1. WSTĘP

Konieczność wzrostu wydobycia węgla kamiennego z dostępnych złóż wyma- ga stałej modernizacji wyposażenia technicznego, elektryfikacji i automa- tyzacji kopalń. Wiąże się z tym wzrost zapotrzebowania na energię elek- tryczną oraz konieczność zapewnienia warunków bezpiecznej eksploatacji sieci i urządzeń elektrycznych.

W przemyśle wydobywczym coraz szersze zastosowanie znajdują urządzenia energoelektryczne, służące do przekształcania i sterowania przepływem energii elektrycznej oraz dopasowania jej postaci do odpowiednich odbiorników. Wysokie walory techniczno-ekonomiczne tych urządzeń, charakteryzujące się głównie: wysoką sprawnością energetyczną, podatnością do sterowania i automatyzacji, niezawodnością pracy, stworzyły warunki do intensywnego ich rozwoju i wdrażania w procesach urabiania, transporcie poziomym i pionowym oraz wentylacji. Przewidywane jest stosowanie stacji falownikowych typu APSF o mocach rzędu 100-500 kVa [5]. Urządzenia energoelektro-niczne stosowane są już obecnie do zasilania napędów maszyn wyciągowych, wentylatorów, a w perspektywie także sprężarek.

Przy powszechnym stosowaniu tych urządzeń w górnictwie istotny będzie problem odkształconych przebiegów prądu i napięcia, powodujący między innymi zakłócenia w pracy zabezpieczeń stosowanych w sieci kopalnianej. Z uwagi na istotną rolę bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń elektrycznych i pewność zasilania, powstała konieczność określenia wpływu tych odkształceń na działanie zabezpieczeń upływowych oraz opracowanie nowych zabezpieczeń przystosowanych do pracy w sieciach z przekształtnikami.

## 2. DOZIEMIENIE W SIECIACH KOPALNIANYCH ZASILANYCH Z UKŁADÓW PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH

Kopalniane wysoko- i niskonapięciowe sieci elektroenergetyczne są sieciami izolowanymi w sensie powiązania z ziemią. Są to sieci, w których nie występują inne celowe połączenia jej elementów z ziemią oprócz połączeń za pośrednictwem urządzeń służących do sygnalizacji, pomiarów, zabezpieczeń itp., o dużej impedancji.

Jednym z ważnych problemów w eksploatacji takich sieci jest spełniająca odpowiednie wymagania ochrona przed skutkami jednofazowych zwarć z ziemią. Problem ten jest szczególnie istotny ze względu na zagrożenia, jakie powodują doziemienia w warunkach środowiska podziemi kopalń.

Istnieje wiele rozwiązań ochrony upływowej i ziemnozwarciowej, lecz skuteczność ich stosowania nie zawsze jest dostateczna. Przyczyną tego stanu może być: nieodpowiednia konstrukcja oraz niewłaściwy dobór [2]. Duży wpływ na niezawodność pracy zabezpieczeń ma pełna znajomość wielkości charakteryzujących doziemienie. Jest to istotne zarówno w fazie projektowania, jak i w fazie eksploatacji zabezpieczeń.

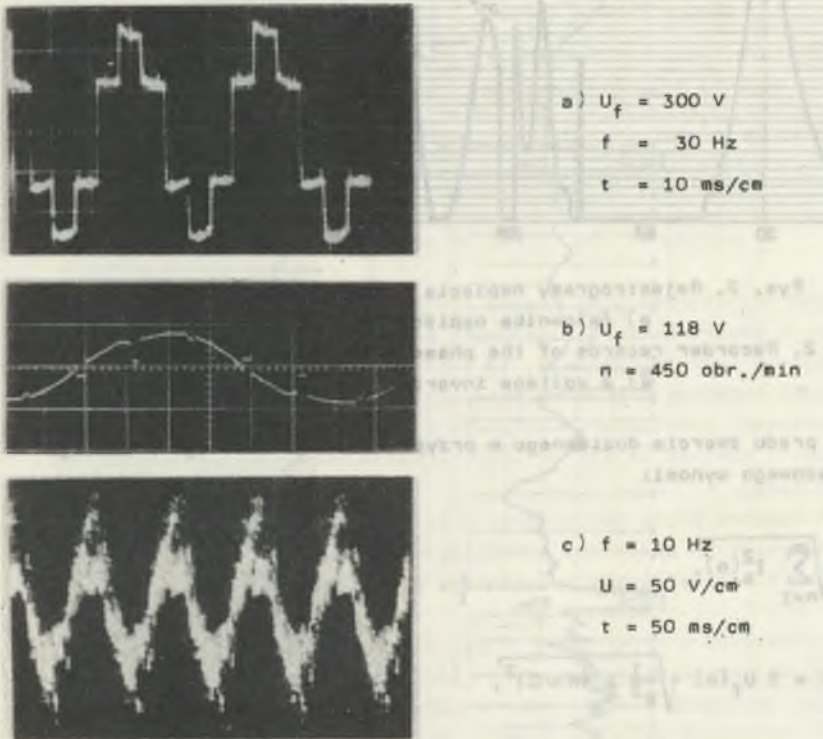
W przypadku stosowania układów przekształtnikowych typu falownikowego małej mocy do zasilania napędów i urządzeń górniczych, należy określić wpływ pracy tych układów na przebieg prądu doziemienia.

Przeprowadzone badania i analiza przebiegów wyjściowych układów przekształtnikowych wykazały, że największym odkształceniem kształtu przebiegu napięcia od przebiegu sinusoidalnego charakteryzują się falowniki napięciowe, w mniejszym stopniu bezpośrednio przemienniki częstotliwości.

natomiast w falowniku prądowym przebieg napięcia poza załamaniem komutacyjnymi jest praktycznie sinusoidalny [3].

Zawartość wyższych harmonicznych w badanych przebiegach falownika napięciowego wynosi  $u_h = 30\%$ .

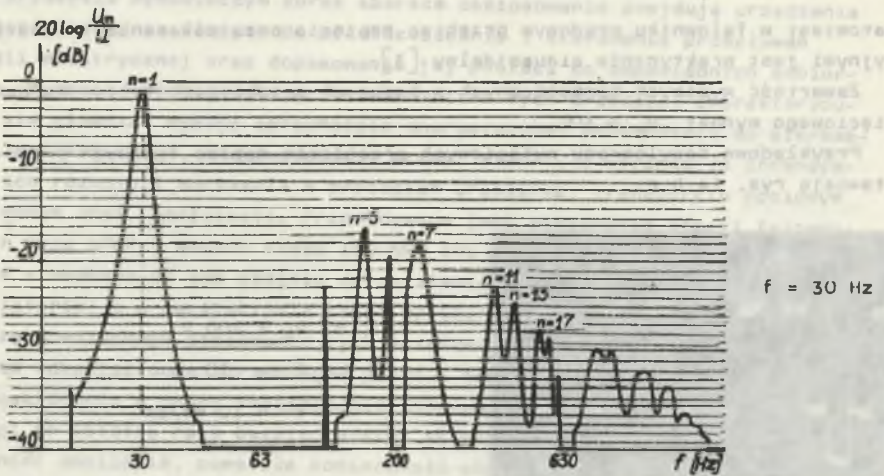
Przykładowe oscylogramy wyjściowych przebiegów napięć fazowych przedstawiają rys. 1a,b,c.



Rys. 1. Rys. 1. Oscylogramy przebiegów napięć fazowych na wyjściu a) falownika napięciowego, b) falownika prądowego, c) bezpośredniego prze-miennika częstotliwości

Fig. 1. Oscillograph records of phase voltages waves on the output of a) a voltage inverter, b) a current inverter, c) an immediate frequency inverter

Analiza zawartości wyższych harmonicznych w przebiegach napięć wyjściowych układów przekształtnikowych wykazała istnienie widma wyższych harmonicznych o wartości bezwzględnej porównywalnej z wartościami 5, 7, 11... harmonicznej (rys. 2a,b,c).



Rys. 2. Rejestrogramy napięcia fazowego na wyjściu  
a) falownika napięciowego

Fig. 2. Recorder records of the phase voltage on the output of  
a) a voltage inverter

Wartość prądu zwarcia doziemnego w przypadku odkształconego przebiegu napięcia fazowego wynosi:

$$I_z = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_z^2(n)},$$

$$I_z(n) = 3 U_f(n) \sqrt{\frac{1}{R^2} + (n\omega C)^2},$$

gdzie:

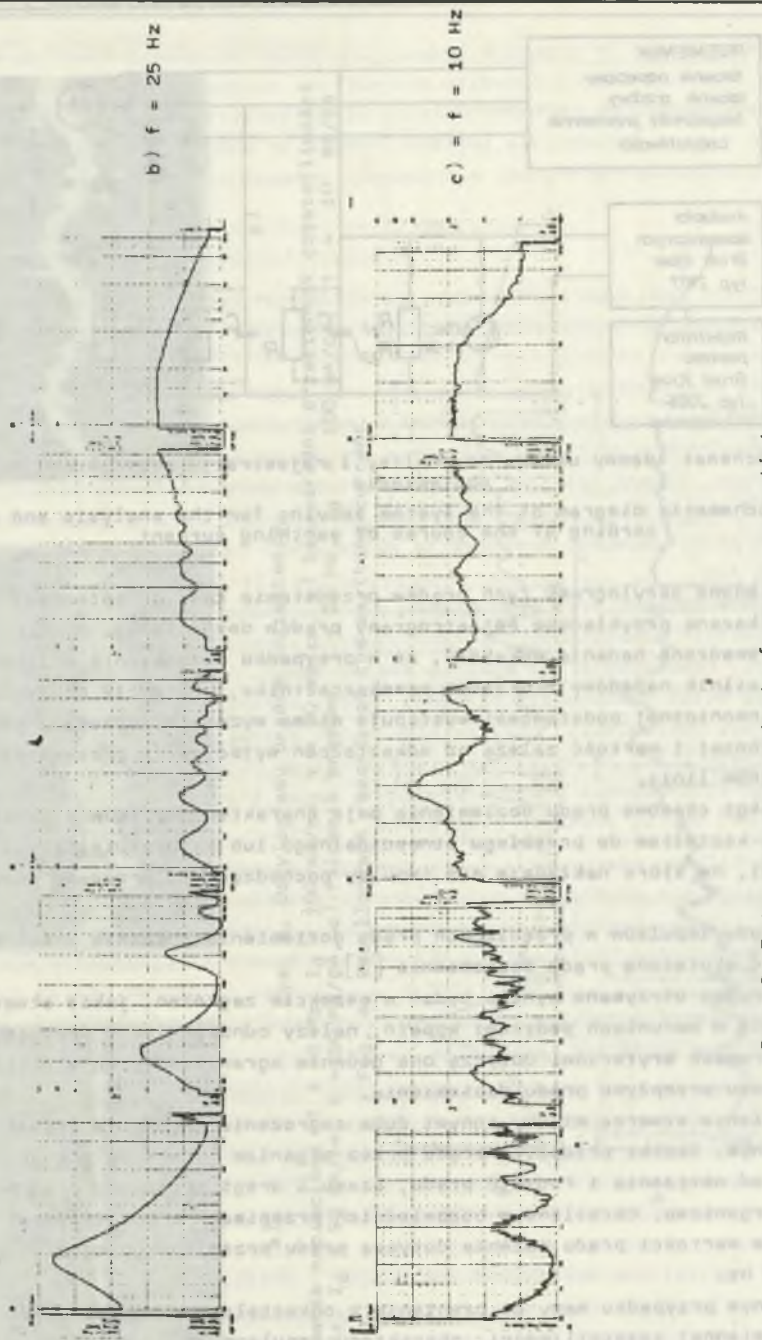
$n$  - rząd wyższej harmonicznej,

$I_z(n)$  - wartość prądu doziemienia  $n$ -tej harmonicznej w przypadku doziemienia metalicznego ( $R_d = 0$ ),

$R, C$  - rezystancja i pojemność fazowa sieci względem ziemi,

$U_f(n)$  - wartość skuteczna  $n$ -tej harmonicznej napięcia fazowego na wyjściu układu falownika.

Z zależności tych wynika, że całkowita wartość skuteczna prądu zwarcia doziemnego zależy od wartości wszystkich harmonicznych występujących w tym prądzie. Badania przebiegów prądu doziemienia wykonano w sieci modelowej, zasilanej z rzeczywistych układów przekształtnikowych (rys. 3), symulując doziemienie lub obniżenie poziomu rezystancji izolacji jednej z faz w stosunku do ziemi. Spadki napięcia na rezystancjach  $R_{z1} = 1 \Omega$  i  $R_{z2} = 1 k\Omega$  określają spodziewane wartości prądu doziemienia.

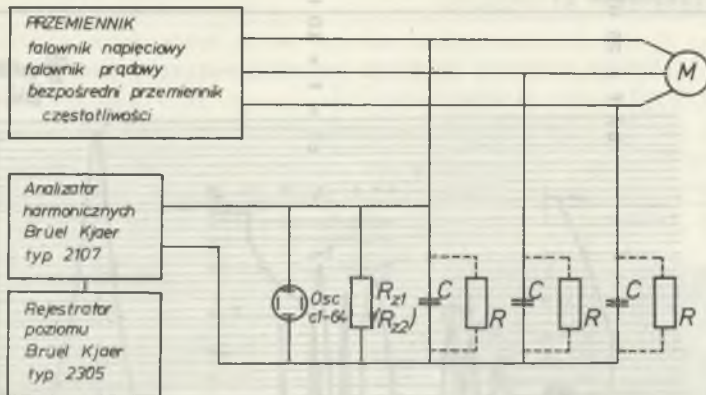


Rys. 2. Rejestrograms napięcia fazowego na wyjściu

b) falownika prądowego, c) bezpośredniego przemiennika częstotliwości

Fig. 2. Recorder records of the phase voltage on the output of

b) a current inverter, c) an immediate frequency inverter



Rys. 3. Schemat ideowy układu do analizy i rejestracji przebiegów prądu doziemienia

Fig. 3. Schematic diagram of the system serving for the analysis and recording of the course of earthing current

Przykładowe oscylogramy tych prądów przedstawia rys. 4, natomiast na rys. 5 pokazano przykładowe rejestrogramy prądów doziemienia.

Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku doziemienia w linii łączącej silnik napędowy z układem przekształtnika, w prądzie doziemienia oprócz harmonicznej podstawowej występuje widmo wyższych harmonicznych, których rodzaj i wartość zależą od odkształceń wyjściowych przekształtnika i parametrów linii.

Przebiegi czasowe prądu doziemienia mają charakter impulsów o obwiedni zbliżonej kształtem do przebiegu sinusoidalnego lub są przebiegami sinusoidalnymi, na które nakładają się impulsy pochodzące od procesów komutacyjnych.

Amplitudy impulsów w przebiegach prądu doziemienia znacznie przekraczają wartość skuteczną prądu doziemienia [3].

Rozpatrując otrzymane wyniki badań w aspekcie zagrożeń, jakie stwarza doziemienie w warunkach podziemi kopalń, należy odnosić je do przyjętych w tych sprawach kryteriów. Dotyczą one głównie ograniczania do minimum mocy i czasu przepływu prądu doziemienia.

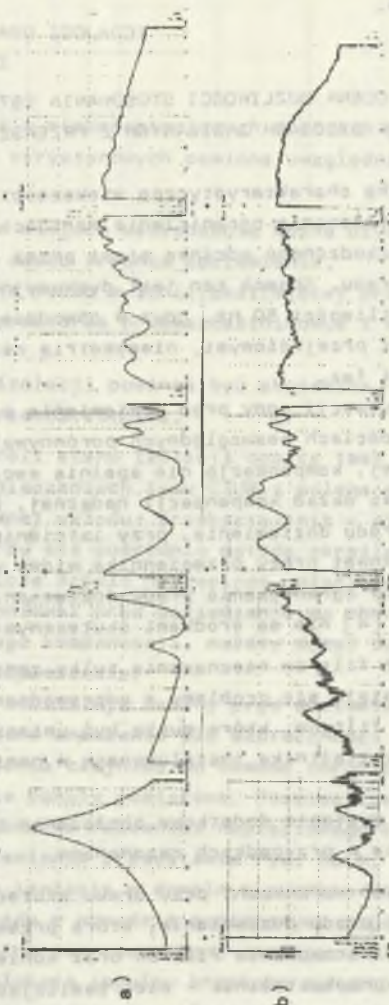
Doziemienie stwarza między innymi duże zagrożenie porażenia prądem elektrycznym. Skutki przepływu prądu przez organizm ludzki są różnorodne i zależą od natężenia i rodzaju prądu, czasu i drogi przepływu oraz właściwości organizmu. Określone w odpowiednich przepisach i publikacjach dopuszczalne wartości prądu rażenia dotyczą prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz.

W badanym przypadku mamy do czynienia z odkształconymi przebiegami prądu o zmiennej częstotliwości, charakteru impulsowego o amplitudzie impulsów osiągającej wartości kilkuset mA. Taki szczególny charakter prądu doziemienia nie pozwala jednoznacznie określić (przy aktualnym stanie ba-



Rys. 4. Oscylogramy prądów doziemienia  
 a) falownik napięciowy  $f = 40$  Hz,  $I_d = 100$  mA/cm,  $t = 10$  ms/cm, b) bezpośredni przełącznik częstotliwości  $f = 5$  Hz,  $I_d = 50$  mA/cm,  $t = 50$  ms/cm, c) falownik prądowy  $f = 25$  Hz,  $I_d = 100$  mA/cm,  $t = 10$  ms/cm

Fig. 4. Oscillograph records of the earthing current



Rys. 5. Rejestrogramy prądów doziemienia  
 a) falownik prądowy, b) bezpośredni przełącznik częstotliwości

Fig. 5. Recorder records of the earthing current

dan: jego wpływu na organizm ludzki [2]. Mając na uwadze fakt, że o reakcji na organizm ludzki decyduje nie wartość skuteczna natężenia prądu, lecz jego amplituda, a nawet wartość międzyszczytowa [1], należy uznać problem ten za szczególnie istotny. Wymaga on podjęcia badań nad środkami ochrony przeciwporażeniowej w przypadku stosowania układów przekształtnikowych.

### 3. OCENA MOŻLIWOŚCI STOSOWANIA ISTNIEJĄCYCH ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH W SIECIACH ZASILANYCH Z PRZEKSZTAŁTNIKÓW

Cechą charakterystyczną większości rozwiązań zabezpieczeń upływowych jest stosowanie ograniczenia wartości prądu doziemienia do czasu wyłączenia uszkodzonego odcinka sieci przez kompensację składowej pojemnościowej tego prądu. Sposób ten jest dyskusyjny nawet przy zasilaniu napięciem o częstotliwości 50 Hz, gdyż w obwodzie kompensacji mamy do czynienia ze stanami przejściowymi, niesymetrią rezystancji izolacji i pojemności doziemnej faz.

W sytuacji, gdy prąd doziemienia zawiera widmo wyższych harmonicznych o wartościach bezwzględnych porównywalnych z wartością harmoniczną podstawowej, kompensacja nie spełnia swoich zadań. Należałoby bowiem zbudować taki układ kompensacji nadążnej, który ograniczałby skutecznie wartość prądu doziemienia, przy istnieniu dla każdej wartości częstotliwości podstawowej pracy przemiennika widma wyższych harmonicznych.

Próby ograniczania prądu doziemienia przez stosowanie układów filtrujących [4] nie są środkami skutecznymi, gdyż:

- układy filtrów nieznacznie tylko zmniejszają wartość tego prądu,
- pojawiają się problemy z odprowadzaniem ciepła wydzielanego na elementach filtrów, które muszą być umieszczone w osłonie ognioszczelnej przekształtnika instalowanego w pomieszczeniach z zagrożeniem wybuchowym,
- mogą wystąpić dodatkowe obciążenia przekształtnika przez filtry, szczególnie w przypadkach rezonansów.

W tych warunkach, przy braku skutecznej kompensacji składowej pojemnościowej prądu doziemienia, która przeważa w tym prądzie, przy małej efektywności stosowania filtrów oraz konieczności kontroli stanu izolacji dla układu przekształtnik - sieć zasilająca silnik istniejące zabezpieczenia upływowe nie spełniają swoich zadań, tzn. nie zmniejszają wartości mocy przenoszonej przez uszkodzenie do czasu wyłączenia zasilania.

Prąd doziemienia w sieciach zasilanych z przekształtnika będzie znacznie przekraczał wartości dopuszczalne, a powstałe zagrożenie można ograniczyć przez skracanie czasu jego przepływu. Pojawienie się w tej sieci doziemienia wymaga szybkiego odłączenia napięcia zasilającego, zablokowa-



nia impulsów bramkowych tyrystorów oraz rozładowania energii zgromadzonej w elementach reaktancyjnych przekształtnika.

#### 4. KONCEPCJA SPOSOBU KONTROLI STANU IZOLACJI W SIECIACH Z PRZEKSZTAŁTNIKAMI

Koncepcja kontroli stanu izolacji w niskonapięciowych sieciach górniczych zasilanych z przekształtników tyrystorowych powinna uwzględniać następujące czynniki:

- ograniczenie energii wydzielanej w miejscu uszkodzenia można uzyskać praktycznie tylko przez skracanie czasu trwania doziemienia,
- możliwość powstania uszkodzenia nie tylko w linii zasilającej przekształtnik, lecz również w transformatorze przekształtnikowym i w przekształtniku,
- opracowana metoda kontroli stanu izolacji powinna być skuteczna, niezależnie od rodzaju zastosowanego przekształtnika.

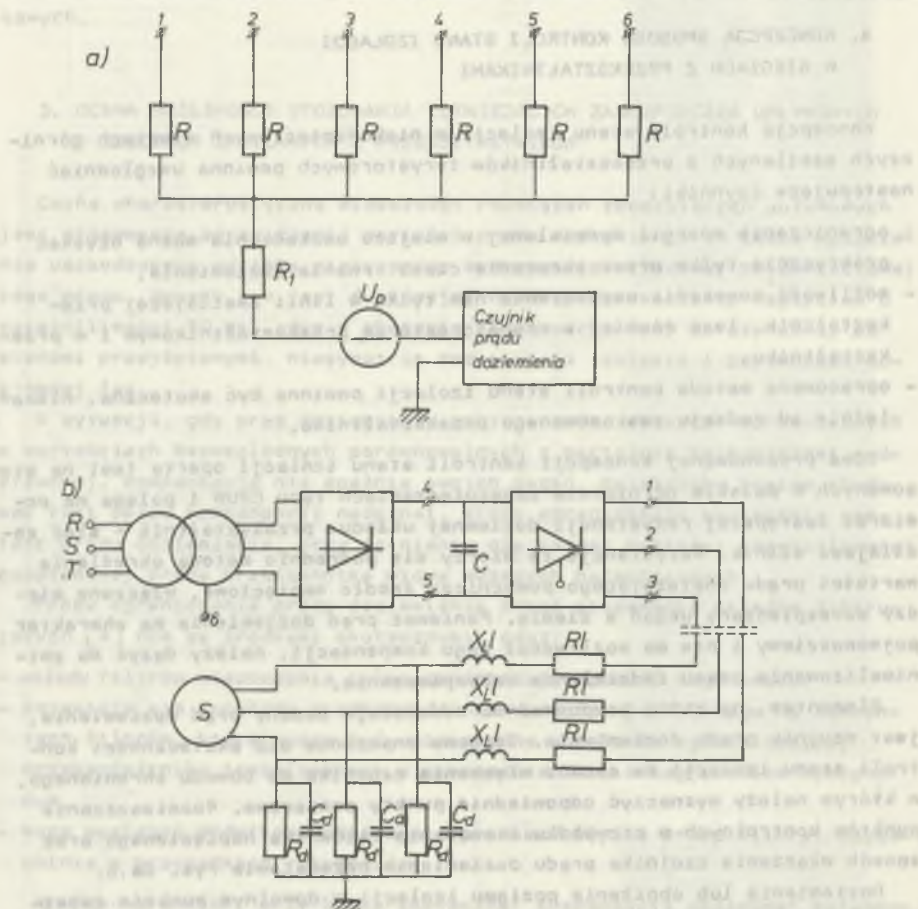
Idea proponowanej koncepcji kontroli stanu izolacji oparta jest na stosowanych w polskim górnictwie zabezpieczeniach typu CZUW i polega na pomiarze zastępczej rezystancji doziemnej układu: przekształtnik - sieć zasilająca silnik. Rezystancję tą mierzy się pośrednio metodą określenia wartości prądu obciążającego pomocnicze źródło napięciowe, włączone między zabezpieczany układ a ziemię. Ponieważ prąd doziemienia ma charakter pojemnościowy i nie ma możliwości jego kompensacji, należy dążyć do minimalizowania czasu zadziałania zabezpieczenia.

Elementem, na który bezpośrednio oddziałuje badany prąd doziemienia, jest czujnik prądu doziemienia. Istotne znaczenie dla skuteczności kontroli stanu izolacji ma sposób włączenia czujnika do obwodu chronionego, w którym należy wyznaczyć odpowiednie punkty pomiarowe. Rozmieszczenie punktów kontrolnych w przypadku stosowania falownika napięciowego oraz sposób włączenia czujnika prądu doziemienia przedstawia rys. 6a,b.

Doziemienie lub obniżenie poziomu izolacji w dowolnym punkcie zabezpieczonego układu powoduje wzrost prądu w obwodzie pomiarowym, pojawienie się sygnału wyjściowego czujnika, który poprzez człony sterujące i wykonawcze odłącza napięcie zasilania, blokuje impulsy bramkowe tyrystorów oraz powoduje rozładowanie energii zgromadzonej w elementach reaktancyjnych układu.

Całkowity czas zaniku prądu doziemienia zależy więc od:

- czasu własnego działania czujnika,
- zwłoki czasowej w działaniu stycznika lub wyłącznika,
- czasu potrzebnego do zablokowania impulsów bramkowych,
- stałej czasowej obwodu rozładowania energii na elementach reaktancyjnych.

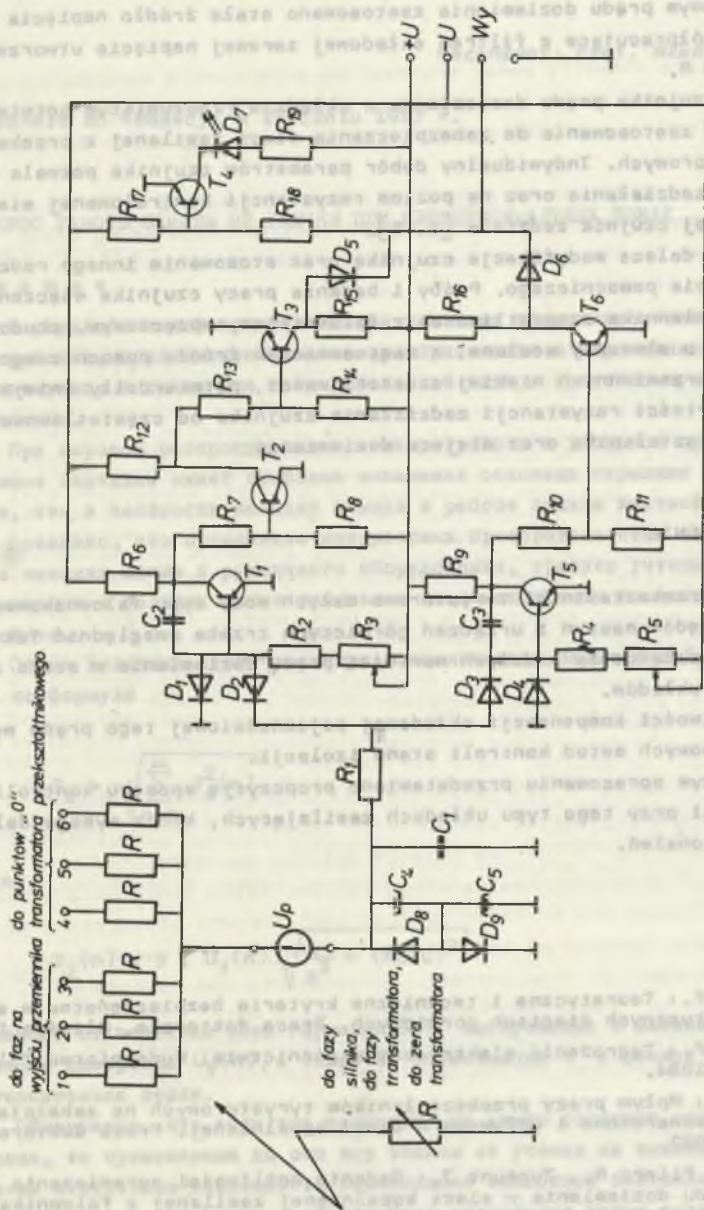


Rys. 6. Schemat ideowy koncepcji sposobu kontroli stanu izolacji

a) sposób podłączenia czujnika prądu doziemienia, b) rozmieszczenie punktów kontrolnych w przypadku stosowania falownika napięciowego

Fig. 6. Schematic diagram of the idea of a control method of the state of insulation

a) method of connection of the earthing current gauge, b) lay-out of control points when applying a voltage inverter



Rys. 7. Schemat ideowy czujnika prądu doziemienia oraz jego sposób podłączenia do bezporadnego przemien-  
nika częstotliwości  
 Fig. 7. Schematic diagram of the earthing current gauge as well as the method of connection to an immediate  
frequency inverter

Schemat ideowy czujnika prądu doziemienia oraz sposób jego połączenia do bezpośredniego przemiennika częstotliwości przedstawia rys. 7. W układzie pomiarowym prądu doziemienia zastosowano stałe źródło napięcia pomocniczego, współpracujące z filtrem składowej zerowej napięcia utworzonym z rezystorów R.

Badania czujnika prądu doziemienia w układzie rzeczywistym potwierdziły możliwość zastosowania do zabezpieczania sieci zasilanej z przekształtników tyrystorowych. Indywidualny dobór parametrów czujnika pozwala wpływać na czas zadziałania oraz na poziom rezystancji kontrolowanej sieci, poniżej której czujnik zadziała [3, 6].

Celowe są dalsze modyfikacje czujnika oraz stosowanie innego rodzaju źródła napięcia pomocniczego. Próby i badania pracy czujnika włączanego w obwód przemiennika częstotliwości z falownikiem napięciowym, zbudowanego w oparciu o elementy scalone, z zastosowaniem źródła pomocniczego o przebiegach przemiennych niskiej częstotliwości, potwierdziły mniejszą zależność wartości rezystancji zadziałania czujnika od częstotliwości wyjściowej przekształtnika oraz miejsca doziemienia.

## 5. ZAKOŃCZENIE

Stosując przekształtniki tyrystorowe małych mocy typu falownikowego do zasilania napędów maszyn i urządzeń górniczych trzeba uwzględnić fakt znacznego odkształcenia i dużych wartości prądu doziemienia w sieci zasilanej z tych układów.

Brak możliwości kompensacji składowej pojemnościowej tego prądu wymaga opracowania nowych metod kontroli stanu izolacji.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono propozycję sposobu kontroli stanu izolacji przy tego typu układach zasilających, która wymaga dalszych badań i udoskończeń.

## LITERATURA

- [1] Krasucki F.: Teoretyczne i techniczne kryteria bezpieczeństwa w elektroenergetycznych sieciach górniczych. Praca doktorska, Gliwice 1969.
- [2] Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1984.
- [3] Pilorz R.: Wpływ pracy przekształtników tyrystorowych na zabezpieczenia ziemnozwarciowe i upływowe w sieci kopalnianej. Praca doktorska, Gliwice 1982.
- [4] Marek B., Pilorz R., Zygmunt J.: Badanie możliwości ograniczania wartości prądu doziemienia w sieci kopalnianej zasilanej z falownika napięciowego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. seria Górnictwo, z. 107/1981.
- [5] Szczucki F.: Urządzenia energoelektroniczne w górnictwie. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1984.

- [6] Praca naukowo-badawcza IEIAG, Badania struktury i charakteru zakłóceń oraz optymalizacja systemów zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Gliwice 1979.

Recenzent: Prof. Władysław GLUZIŃSKI

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1987 r.

ВОПРОС РАБОТЫ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧКИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКАХ

Резюме

В угледобывающей промышленности всё чаще применяются энергоэлектронные устройства, предназначенные для преобразования и управления потоком электроэнергии, а также для согласования её вида с соответствующими токоприёмниками.

При широком распространении этих устройств в угольной промышленности, важное значение имеет проблема искажения основных гармоник тока и напряжения, что в частности наводит помехи в работе защиты шахтной сети.

Показано, что применение инверторных преобразователей малой мощности для питания машин и рудничного оборудования, требует учёта значительного искажения и больших токов замыкания на землю в сети питаемой от этих устройств.

Общая величина этого (тока при металлическом замыкании  $R_D = 0$ ) определена по формуле

$$I_z = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_z^2(n)}$$

где

$$I_z(n) = 3 \cdot U_f(n) \sqrt{\frac{1}{R^2} + (n\omega C)^2}$$

зависит от величины всех гармоник ( $n$ ), выступающих в фазном напряжении на выходе инвертора  $U_f(n)$ , а также от резистанции  $R$  и фазной ёмкости  $C$  сети относительно земли.

Обнаружено, что если ток замыкания на землю содержит спектр высших гармоник, то применяемые до сих пор защиты от утечки не выполняют своих задач из-за отсутствия возможности компенсации ёмкостной составляющей этого тока. В связи с тем возникает необходимость разработки новых методов контроля состояния изоляции. В разработке даётся предложение способа контроля состояния изоляции приспособленного к новым условиям питания.

PROBLEMS OF LEAK CURRENT PROTECTIONS WORK  
AT DEFORMED WAVES

S u m m a r y

In the extractive industry power engineering electronics devices serving for conversion and control of the flow of electric energy as well as matching of its form to suitable energy consumers are applied in an increasing range.

The widespread application of those devices in the mining will cause problems of deformed current and voltage waves, which cause among other things disturbances in the work of electrical protections applied in mining energy supply networks.

It has been proved, that when applying matching system of flow power inverter types for feeding of mining devices and machines, significant wave deformation and high earthing current values in the network fed from those systems will appear.

The total value of this current (at a metallic earthing system  $R_d = 0$ ) determined by the equation:

$$I_z = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_z^2(n)}$$

where:

$$I_z(n) = 3U_f(n) \sqrt{\frac{1}{R^2} + (n\omega C)^2}$$

depends on the total value of all harmonics ( $n$ ) occurring in the phase voltage  $U_f(n)$  on the output of the inverter as well as on the resistance  $R$  and phase capacity  $C$  of the network against earthing.

It was found that in a case the earthing current value contains a spectrum of higher harmonics the hitherto applied leak current protections do not fulfil their duty because of lack of the possibility to compensate the capacitive component of this current. Consequently new methods of control of the state of insulation have to be worked out.

In this work a suggestion concerning control method of the state of insulation accommodated to the new feeding conditions is presented.