

Andrzej WOLSKI, Kazimierz SOŁTYSIK

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki

WPLYW TYRYSTOROWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH MASZYN WYCIĄGOWYCH DUŻYCH MOCY NA SIĘĆ ZAKŁADOWĄ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ układu napędowego z przekształtnikiem tyrystorowym na sieć zasilającą. Podano zależności, z których można określić zawartość wyższych harmonicznych w napięciu sieciowym oraz wielkości spadków napięć spowodowanych udarami mocy biernej. Rozważania teoretyczne zilustrowano przykładem, w którym obliczono wielkości zakłóceń w sieci zakładowej spowodowane pracą tyrystorowego układu napędowego maszyny wyciągowej o mocy 11,6 MW.

1. Wprowadzenie

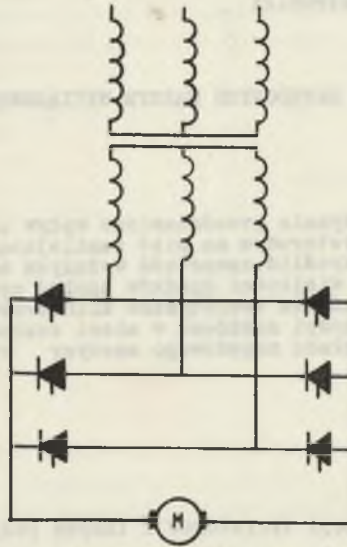
Rozwój technologii produkcji tyrystorów i innych półprzewodników przyczynił się do rozpowszechnienia układów napędowych z wykorzystaniem tych elementów. Równocześnie moce jednostkowe instalowanych tyrystorowych układów napędowych wzrosły do kilku megawatów. Również w układach napędowych kopalnianych maszyn wyciągowych coraz chętniej stosuje się przekształtniki z uwagi na ich dużą pewność działania, mniej kłopotliwą obsługę i łatwość automatyzacji. Jednak układ napędowy z przekształtnikiem tyrystorowym oddziałuje na sieć zasilającą w sposób niekorzystny dla pozostałych odbiorców z uwagi na:

- generację składowych harmonicznych prądu do sieci zasilającej,
- duży pobór mocy biernej przy zwiększaniu wysterowania prostowników.

Skutki oddziaływania tyrystorowego układu napędowego maszyn wyciągowych na sieć zakładową są szczególnie niekorzystne w starszych kopalniach o małym stopniu automatyzacji, w których moc maszyny wyciągowej stanowi poważną część mocy zainstalowanej. W nowo budowanych kopalniach udział mocy maszyn wyciągowych wynosi zwykle około 10% mocy zainstalowanej, jednak ilościowe określenie spadków napięć i zawartości wyższych harmonicznych w napięciu sieci zakładowej jest konieczne. W niniejszym artykule określono zakłócenia powodowane pracą tyrystorowego układu napędowego oraz podano metodę ilościowego ich wyznaczania.

2. Tyrystorowy układ napędowy jako źródło zakłóceń

Tyrystorowy układ napędowy maszyny wyciągowej dużej mocy rozwiązywany jest zwykle w oparciu o silnik prądu stałego. W przeważającej większości przypadków silnik ten zasilany jest z nierewersyjnego pełnosterowanego mostka prostownikowego, przyłączonego do sieci przez oddzielny transfor-



Rys. 1. Schemat ideowy rozpatrywanego układu napędowego

mator, a zmianę kierunku wirowania uzyskuje się przez rewersję strumienia wzbudzenia silnika. Poniżej rozpatrzono oddziaływanie układu napędowego tego typu, przedstawionego schematycznie na rys. 1, na sieć zasilającą. W rozważaniach przyjęto następujące założenia upraszczające:

- dla niskich częstotliwości sieć przedstawiono jako aktywny dwójnik o reaktancji X_L określonej z mocy zwarciowej,
- czas komutacji tyrystorów jest mały, pominięto więc wpływ komutacji w zakresie niskich częstotliwości.

Z rozważań teoretycznych [1] otrzymano zależność na określenie przebiegu prądu fazowego transformatora prostownikowego dla zakresu prądów ciągłych. Zależności wyrażono w jednostkach względnych.

$$I_A(t) = \frac{U_S}{z} \left[\cos(\omega t + \alpha - \varphi - \frac{\pi}{6}) - e^{-\frac{t}{T_u}} \cos(\alpha - \varphi - \frac{\pi}{6}) \right] + I_m e^{-\frac{t}{T_u}} - \frac{E_M}{r} (1 - e^{-\frac{t}{T_u}})$$

$$I_m = k - \frac{U_S}{z} \frac{3}{\pi} \cos(\varphi - \alpha) + \frac{U_S}{z} \cos(\varphi - \alpha + \frac{\pi}{6}) + \frac{1 - \frac{6T_u}{T} + \frac{6T_u}{T} e^{-\frac{T}{6T_u}}}{1 - e^{-\frac{T}{6T_u}}} \frac{U_S}{z} \sin(\varphi - \alpha)$$

$$E_M = \frac{3}{\pi} U_S \cos \alpha - k \cdot r$$

$$z = \sqrt{1 + (2\pi \frac{T_u}{T})^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega}{1000} T_u = 0,314 T_u$$

$$k = \frac{I_{sr}}{I_N} \text{ stopień obciążenia silnika prądu stałego,}$$

T - okres napięcia sieciowego,

T_u - zastępcza stała czasowa obwodu prądu stałego i sieci zasilającej,

I_m - składowa stała prądu wyprostowanego I_d ,

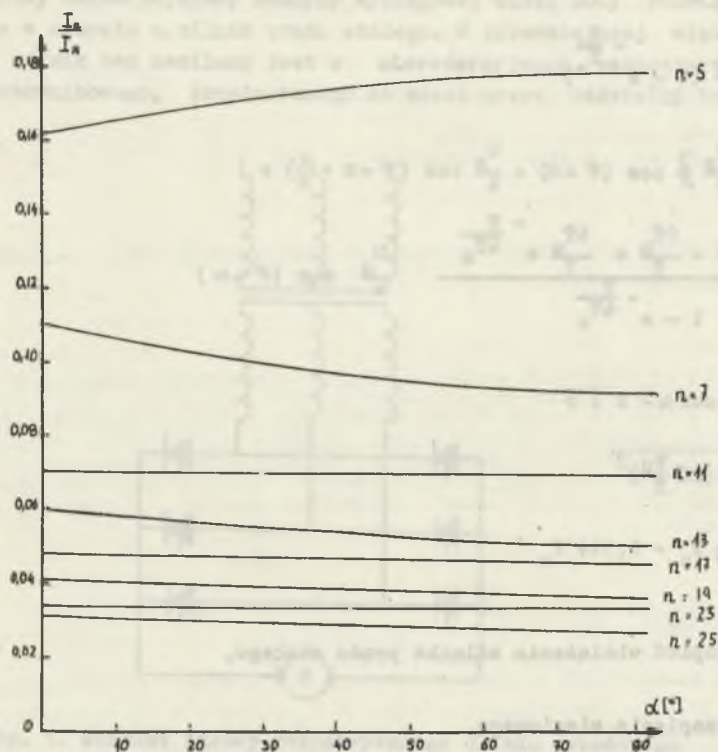
U_S - amplituda napięcia międzyprzewodowego po stronie wtórnej transformatora prostownikowego odniesiona do U_n ,

E_M - siła elektromotoryczna silnika prądu stałego odniesiona do napięcia znamionowego silnika,

α - kąt opóźnienia włączenia tyrystorów,

r - względna rezystancja silnika prądu stałego i zaworu odniesiona do rezystancji silnika.

Rozkładając tę funkcję na szereg Fouriera można obliczyć wartości skuteczne poszczególnych harmonicznych prądu fazowego dla różnych parametrów k, α, T_u . Obliczenia te zostały wykonane na maszynie cyfrowej [3] a przykładowe wyniki dla stałej czasowej $T_u = 40$ ms przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zależność wyższych harmonicznych prądu fazowego transformatora od kąta opóźnienia zapłonu α dla $T_u = 40$ ms i $k = 1$. Wartość pierwszej harmonicznej wynosi 0,78

Z obliczeń wynikają następujące wnioski:

- przy dużych stałych czasowych ($T_u = 40$ ms) zawartość wyższych harmonicznych jak również ich zależność od kąta α maleje,
- przy małych stałych czasowych ($T_u = 5$ ms) występuje duża zawartość wyższych harmonicznych w prądzie fazowym transformatora i zależą one silnie od kąta opóźnienia włączenia tyrystorów,
- przy małych obciążeniach stopień odkształcenia prądu fazowego transformatora jest większy,
- pierwsza harmoniczna jest wprost proporcjonalna do stopnia obciążenia silnika i nie zależy od kąta α i stałej czasowej,

- rząd harmonicznych występujących w prądzie fazowym oblicza się ze wzoru $n = pm \pm 1$ czyli dla $m = 6$ otrzymuje się 5, 7, 11, 13, 17 itd.

Duża zawartość wyższych harmonicznych w prądzie sieciowym może powodować:

- zwiększenie strat mocy w sieci,
- zaburzenia w pracy układu z uwagi na zniekształcenie napięcia,
- zwiększenie strat mocy w bateriach kondensatorów,
- zwiększenie strat dodatkowych w transformatorze.

Zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym można uzyskać przez stosowanie filtrów wyższych harmonicznych i stosowanie takich układów połączeń transformatorów przy pracy równoległej i szeregowej napędów, aby otrzymać przesunięcie o 30° pomiędzy pierwszymi harmonicznymi napięć transformatorów. Filtry wyższych harmonicznych umożliwiają pracę kondensatorów kompensujących moc bierną podstawowej harmonicznej przy znacznym odkształceniu napięcia sieci.

Drugim niekorzystnym skutkiem pracy tyrystorowego układu napędowego jest gwałtowny pobór mocy biernej z sieci zasilającej, przy zwiększaniu kąta wysterowania przekształtnika. Zależność pomiędzy mocą bierną a mocą pozorną w układzie prostownikowym określona jest zależnością:

$$\frac{Q}{S_1} = \sqrt{1 - \left(\frac{U_d}{U_{d0}}\right)^2}$$

W czasie rozruchu i hamowania układ pobiera bardzo dużą moc bierną w ciągu krótkiego czasu. Udarы mocy biernej wywołują szybko zmienne spadki napięć na reaktancjach wzdluznych (sieć i transformator), których wartość może osiągnąć kilkanaście % U_n . Tak duże i szybkie zmiany napięcia zasilającego są niedopuszczalne ze względu na inne urządzenia zasilane z tej sieci. Zmniejszenie udarów mocy biernej można uzyskać przez kaskadowe połączenie układów prostownikowych, stosowanie baterii kondensatorów stopniowo włączanych szybkimi łącznikami tyrystorowymi lub stosowanie kompensatorów o tyrystorowym forsowaniu wzbudzenia.

3. Sposób obliczenia wielkości zakłóceń spowodowanych pracą napędu tyrystorowego

Chcąc obliczyć wielkości zakłóceń należy znać pewne dane wyjściowe, a mianowicie:

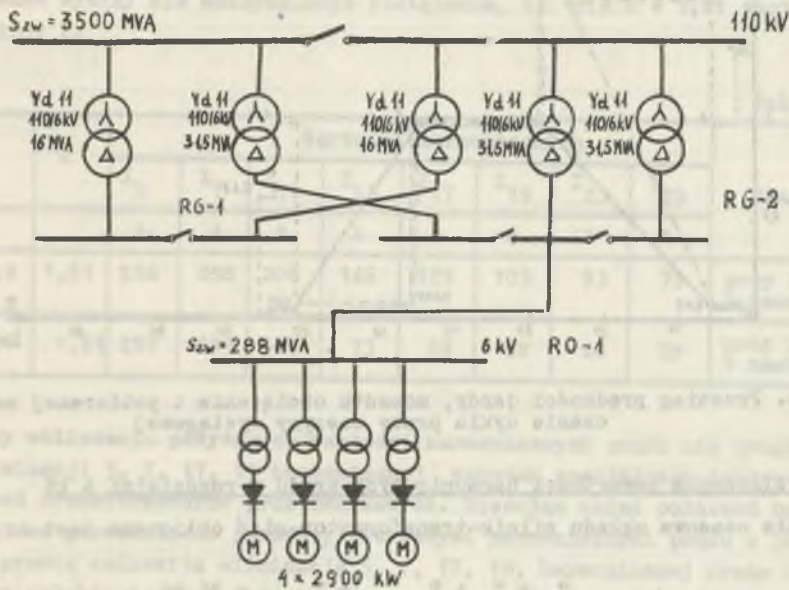
- schemat zasilania zakładu, moc zwarcia i $\cos \varphi$ na szynach stacji 6 kV,
- schemat zakładowej sieci rozdzielczej 6 kV, moc zwarciovą poszczególnych rozdzielni oraz pozostałe parametry sieci,
- dane znamionowe napędów tyrystorowych pracujących na terenie zakładu oraz dane układu przekształtnikowego.

Znając stopień obciążenia silnika w układzie napędowym w poszczególnych punktach pracy, określamy z krzywych $\frac{I_{nh}}{I_N} = f(k, \alpha, T_u)$ - rys. 2 - zawartość n-tej harmonicznej w prądzie pobieranym przez silnik. Uwzględniając przekładnię transformatorów prostownikowych i ich grupę połączeń możemy obliczyć wartość n-tej harmonicznej sieci 6 kV. Zakładając, że reaktancja sieci 6 kV jest dana poprzez znajomość mocy zwarcioviej, obliczamy spadki napięć na reaktancji wzdłużnej sieci odpowiadające n-tym harmonicznym prądom. Można więc obliczyć wypadkową zawartość wyższych harmonicznych w napięciu sieci 6 kV. Wahania napięcia na szynach rozdzielni oddziałowej oraz szynach stacji 6 kV obliczamy, znając maksymalny pobór mocy biernej w czasie pracy układu napędowego, ze wzoru na spadek napięcia wywołanego przepływem mocy biernej w sieci.

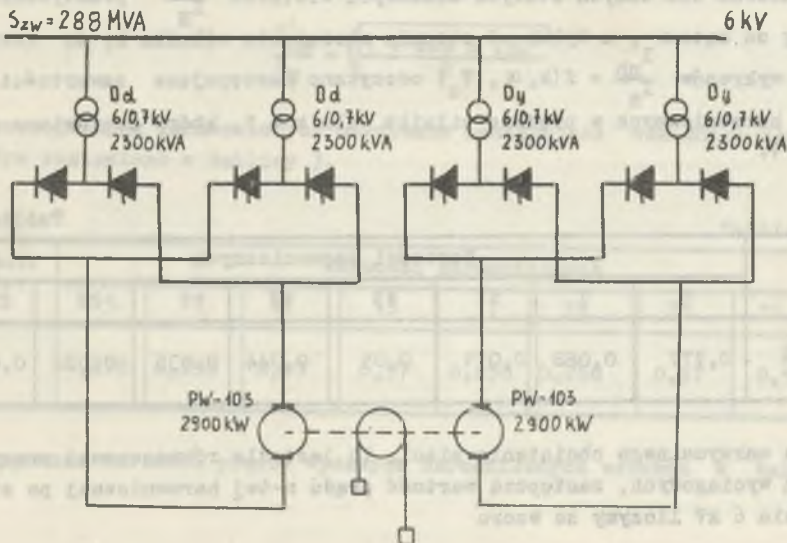
4. Przykład obliczeniowy

Sposób obliczania wielkości zakłóceń spowodowanych pracą napędu tyrystorowego zilustrowano na przykładzie kopalni. Kopalnia posiada na swoim terenie tyrystorowe napędy o dużej mocy, a mianowicie napędy dwu maszyn wyciągowych o łącznej mocy 11,6 MW. Zasilanie kopalni odbywa się z sieci 110 kV. Centralnym punktem rozdziału energii jest stacja 110 kV, o mocy zwarcioviej 3500 MVA i $\cos \varphi = 0,93$. Zasila ona poprzez 5 transformatorów dwie rozdzielnie 6 kV RG-1 i RG-2. Suma mocy zainstalowanych transformatorów 110/6 kV wynosi 126,5 MVA. Nie występuje praca równoległa transformatorów. Wszystkie tyrystorowe napędy znajdujące się na terenie kopalni zasilane są z rozdzielni 6 kV RO-1 o mocy zwarcia $S_{2w} = 288$ MVA. Rozdzielnia RO-1 zasilana jest kablami z wydzielonej sekcji szyn RG-1. W czasie normalnej pracy układu nie występuje więc galwaniczne połączenie RO-1 z pozostałą częścią zakładowej sieci rozdzielczej 6 kV. Schemat zasilania rozdzielni RO-1 przedstawiono na rys. 3. Każda z maszyn wyciągowych o udźwigu $Q = 25$ T napędzana jest dwoma silnikami typu PW-103 o mocy 2900 kW każdy. Sumaryczna moc silników napędowych wynosi 11,6 MW. Każdy silnik zasilany jest z dwóch 6-fazowych mostków tyrystorowych pracujących równolegle. Mostki tyrystorowe zasilane są z oddzielnych transformatorów prostownikowych o grupach połączeń Dd i Dy. Schemat zasilania silników napędowych jednej maszyny wyciągowej pokazano na rys. 4. Wykres pracy maszyny

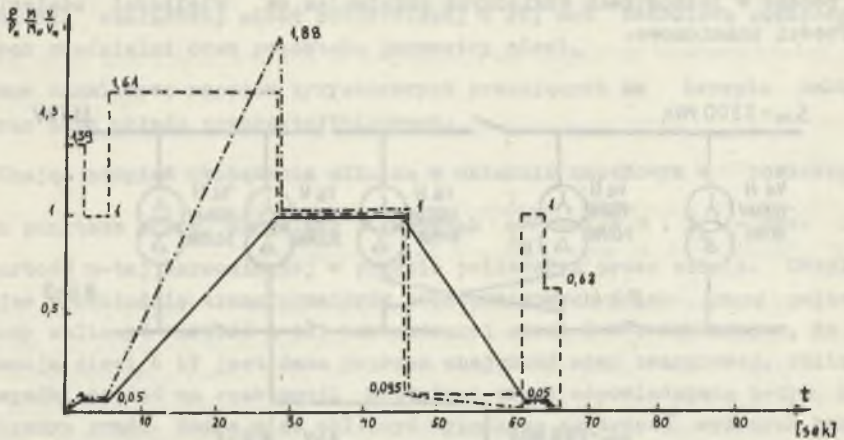
wyciągowej przedstawiono na rys. 5, a wszystkie naniesione na nim wartości podano w jednostkach względnych przyjmując za wielkości odniesienia wartości znamionowe.



Rys. 3. Schemat ideowy układu zasilania napędów tyrystorowych



Rys. 4. Schemat zasilania silników napędowych maszyny wyciągowej



Rys. 5. Przebieg prędkości jazdy, momentu obciążenia i pobieranej mocy w czasie cyklu pracy maszyny wyciągowej

4.1. Obliczenia zawartości harmonicznych prądu w rozdzielni 6 kV

Stała czasowa układu silnik-transformator-sieć obliczana jest ze wzoru

$$T_u = T_s + T_{\text{trafo}} + T_{\text{sieć}} = 35 \text{ ms}$$

Ponieważ dla dużych stałych czasowych wielkość $\frac{I_{nh}}{I_N}$ praktycznie nie zależy od kąta α , a tylko od stopnia obciążenia silnika k , to korzystając z wykresów $\frac{I_{nh}}{I_N} = f(k, \alpha, T_u)$ odczytano następujące zawartości wyższych harmonicznych w prądzie silnika dla $k = 1$, które zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1

	Wartości harmonicznych							
	5	7	11	13	17	19	23	25
$\frac{I_{nh}}{I_N}$	0,177	0,088	0,071	0,05	0,044	0,035	0,032	0,027

Dla maksymalnego obciążenia sieci, to jest dla równoczesnej pracy dwu maszyn wyciągowych, zastępczą wartość prądu n -tej harmonicznej po stronie napięcia 6 kV liczymy ze wzoru

$$I'_n \text{ zast} = \left(\frac{I_{nh}}{I_N} \right)_{k=1} \frac{1}{\delta \pi_p} \sum I_N$$

Otrzymane wyniki dla maksymalnego obciążenia, tj. dla $k = 1,61$ zestawiono w tabelicy 2.

Tabelica 2

t	k	Wartości harmoniczych								Uwagi
		I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	I_{17}	I_{19}	I_{23}	I_{25}	
sek		A	A	A	A	A	A	A	A	
5-28,8	1,61	518	258	208	146	129	103	93	79	przy pracy 2 maszyn
5-28,8	1,61	259	129	104	73	69	52	46	39	przy pracy 1 maszyny

Przy obliczaniu powyższych wartości harmoniczych prądu nie uwzględniono eliminacji 5, 7, 17, 19 harmoniczej wskutek specjalnego doboru grup połączeń transformatorów prostownikowych. Stosując układ połączeń Dd, Dy zapewniono przesunięcie pomiędzy pierwszymi harmonicznymi prądu o 30° . Daje to prawie całkowitą eliminację 5, 7, 17, 19, harmoniczej prądu i nieznaczne osłabienie pozostałych. Dla tego przypadku wskaźnik tłumienia liczy się ze wzoru

$$\frac{I'_{nh}}{I_N} = \sqrt{\frac{1 + \cos n \cdot 30^\circ}{2}}$$

Dla poszczególnych harmoniczych otrzymano następujące wskaźniki tłumienia, które zestawiono w tabelicy 3.

Tabelica 3

Wskaźnik tłumienia	Wartości harmoniczych							
	5	7	11	13	17	19	23	25
$\frac{I_{nh}}{I_N}$	0,258	0,258	0,97	0,97	0,258	0,258	0,97	0,97

Skorygowane wartości prądów wyższych harmoniczych zebrano w tabelicy 4.

Tablica 4

t	k	Wartości harmonicznych								Uwagi
		I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	I ₁₇	I ₁₉	I ₂₃	I ₂₅	
sek		A	A	A	A	A	A	A	A	
5-28,8	1,61	134	66	202	142	33	26	90	76	przy pracy 2 maszyn
5-28,8	1,61	67	33	101	71	16	13	45	38	przy pracy 1 maszyny

Procentową zawartość wyższych harmonicznych w napięciu na szynach 6 kV wywołaną pracą przekształtników tyrystorowych obliczono ze wzoru

$$U_{n\%} = 1,14 n \frac{I_{nh}}{S_{zw}} [\%]$$

Dla wartości poszczególnych harmonicznych obliczonych z powyższego wzoru należy dodać pierwotną zawartość wyższych harmonicznych wywołaną pracą transformatorów sieci zasilającej. Zgodnie z wynikami pomiarów Instytutu Energetyki [2] zebranymi w tablicy 5 wynoszą one

Tablica 5

Wartości wyższej harmonicznej	3	5	7	11	13	13	f ^o %
U _{n%}	1	1,5	0,8	0,6	0,5	0,2	2,2%

Ostatecznie zawartość wyższych harmonicznych podana w procentach napięcia znamionowego na szynach 6 kV ujęta jest w tablicy 6.

Tablica 6

t	k	Wartości harmonicznych									Uwagi
		U ₅	U ₇	U ₁₁	U ₁₃	U ₁₇	U ₁₉	U ₂₃	U ₂₅	%	
sek		%	%	%	%	%	%	%	%	%	
5-28,8	1,61	4,16	2,63	9,4	7,8	2,28	1,95	8,2	8,5	17,5	przy pracy 2 maszyn
5-28,8	1,61	2,83	1,72	5,0	4,1	1,14	0,97	4,1	3,7	9,3	przy pracy 1 maszyny

4.2. Obliczenia wahań napięcia spowodowanych udarami mocy biernej

W sieciach przemysłowych 6 kV stosunek R_B / X_B jest mały, rzędu 0,1, stąd też o amplitudzie wahań napięcia praktycznie decydować będzie jedynie zakres wahań mocy biernej, a ściśle nagłe udary tej mocy występujące w okresie rozruchu i hamowania napędu. Maksymalna wartość poboru mocy biernej występująca przy równoczesnym rozruchu dwu maszyn wyciągowych wynosi

$$Q_p \text{ wyp} = 24 \text{ (Mvar)}$$

Wahania napięcia na szynach 6 kV w rozdzielni RO-1 wyniosą

$$U\% = \frac{U}{U_{SN}} \% = \frac{110 Q_p \text{ wyp}}{S_{zw}} = \frac{110 \cdot 24}{288} = 9,2 \%$$

Wahania napięcia na szynach 110 kV stacji zasilającej wyniosą

$$U\% = \frac{110 Q_p \text{ wyp}}{S_{zw}} = \frac{110 \cdot 24}{3500} = 0,76 \%$$

Jeśli jedna z maszyn pracuje w stanie ustalonym (pełna prędkość) lub stoi, a w drugiej następuje rozruch, to wahania napięcia są o połowę mniejsze niż w przypadku poprzednim.

6. Wnioski

Przy maksymalnym obciążeniu i równoczesnej pracy dwu maszyn wyciągowych zawartość wyższych harmonicznych w napięciu sieciowym na szynach rozdzielni RO-1 wynosi 17,5 %. W przeważającym okresie czasu wartość ta będzie wynosiła około 12% z powodu stosunkowo małego prawdopodobieństwa równoczesnej pracy obu maszyn.

Rozdzielnia 6 kV zasilająca przekształtniki tyrystorowe nie jest połączona w sposób galwaniczny z siecią rozdzielczą 6 kV zakładu. Jest ona zasilana z wydzielonego transformatora o mocy 31,5 MVA. Dlatego też jedyną drogą przenoszenia zakłóceń na sieć zakładową jest rozdzielnia górnego napięcia 110 kV. Jednak moc zwarciova występująca na szynach rozdzielni 110 kV jest tak duża, że zakłócenia wnoszone przez przekształtniki stają się niezauważalne. Maksymalny pobór mocy biernej przy rozruchu dwu maszyn wyciągowych wynosi 24 (Mvar). Powoduje to wahania napięcia na szynach 6 kV równe 9,2%, a na szynach 110 kV stacji zasilającej 0,7%. Przy pracy tylko jednej maszyny powyższe wartości są o połowę mniejsze i wynoszą odpowiednio 4,6% i 0,38%. W konsekwencji nie ma potrzeby instalowania dodatkowych urządzeń do kompensacji udarów mocy biernej.

Z powodu nieznacznego oddziaływania tyrystorowych napędów maszyn wyciągowych na sieć kopalnianą nie istnieje potrzeba w tym konkretnym przypadku instalowania dodatkowych urządzeń w celu zmniejszenia tych oddziaływań. Ich skuteczność byłaby mała, a zainstalowanie pociągnęłoby za sobą znaczne koszty.

LITERATURA

- [1] Instytut Energetyki - Zakład Sieci Rozdzielczych: "Tymczasowe wytyczne projektowania kompensacji mocy biernej i ograniczenia zakłóceń w sieciach zasilających przekształtniki tyrystorowe". Nr ewid. 9011 Katowice 1971.
- [2] Instytut Energetyki - Zakład Sieci Rozdzielczych: "Badania układów kompensacyjnych i ograniczających zakłócenia sieciowe wywołane pracą doświadczalnego tyrystorowego układu napędowego". Nr ewid. 9010 - Katowice 1971.
- [3] Politechnika Śląska - Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Ogólnej: "Analiza teoretyczna tyrystorowych układów nawrotnych prądu stałego jako źródeł zakłóceń sieciowych". Symbol NB-439/336 RE-3/4/4/70, Gliwice, 1970.
- [4] Ivner S.: "The influence of thyristor convertors on supply networks". ASEA Journal, 1971 nr 2. s 37-40.
- [5] Ivner S.: "Kondensatoranlagen mit Thyristorschaltgliedern zur Blindleistungskompensation". ASEA - Zeitschrift 1971 nr 6.
- [6] Grześlak S., Gzyl J.: "Zjawiska związane z instalowaniem w zakładach przemysłowych układów prostowniczych dużej mocy". Biuletyn Elektroprojektu nr 2, 1973.
- [7] Maciejewski J., Kapica B., Berg A.: "Doświadczenia uzyskane przy Kompensacji mocy biernej i wyższych harmonicznych w zakładowej sieci rozdzielczej z prostownikami dużej mocy. Biuletyn Elektroprojektu nr 3, 1973.
- [8] Politechnika Śląska - Instytut Podstawowych Problemów Elektroniki i Energoelektroniki. "Analiza teoretyczna tyrystorowych układów nawrotnych prądu stałego. Symbol: NB 510/385, Gliwice, 1971.
- [9] Biątkiewicz Z.: "Wpływ baterii kondensatorów, odbiorników i systemu elektroenergetycznego na wartości wyższych harmonicznych w napięciu". Energetyka nr 25 i 26/1971. Biuletyn Instytutu Energetyki nr 3/4 i nr 5/6.

Przyjęto do druku w listopadzie 1973 r.

ВЛИЯНИЕ ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ
МАШИНЫ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ВНУТРЕНнюю ЗАВОДСКУЮ СЕТЬ

Резюме

В статье представлено влияние тиристорного электрипривода на питающую сеть. Приведены зависимости с помощью которых можно определить содержание высших гармоник в напряжении сети, а также величину подення напряжении вызванного ударами реактивной мощности.

Теоретические рассуждения проиллюстрировано примером, в котором подсчитана величина помех в заводской сети вызванных работой тиристорного электрипривода шахтной подъемной машины мощностью II, 6 мегаватта.

THE INFLUENCE OF THYRISTOR DRIVE OF THE WINDING MACHINES ON SUPPLY
NETWORKS

Summary

This article describes the influence of the reactive power consumption and generation of harmonics by thyristor converters on supply networks. The mine principles of calculations of the harmonic amplitudes in network current and power factor are given. The theoretic principles are illustrated by an axample in which the values of the disturbances caused by thyristor drive of the winding machine of rated power 11,6 MW are calculated.