

INSTYTUT UKŁADÓW ELEKTROMASZYNOWYCH
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport z serii PRE nr 22/82

ANALIZA ODDZIAŁYWANIA TYRYSTOROWYCH
NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH MASZYN
PAPIERNICZYCH NA SIEĆ WEWNĘTRZNA
PAPIERNI

Rozprawa doktorska
Maciej Pawłowski

Słowa kluczowe: elektrotechnika, napęd elektryczny, układy
tyrystorowe, maszyny papiernicze

Promotor: doc. dr hab. inż. Andrzej Horodecki

Wrocław 1982

Mgr inż. Maciej Pawłowski
Instytut Układów Elektromaszynowych
ul. Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław

Raport wpłynął 30.08.1982

SPIS TREŚCI

Wykaz oznaczeń	6
1. WSTĘP	9
1.1. Uwagi ogólne	9
1.2. Zakres i tezy pracy	11
2. WYŻSZE HARMONICZNE PRĄDU POBIERANE Z SIECI ZASILAJĄ- CEJ PRZEZ PROSTOWNIKI SZESCIOPULSOWE	14
2.1. Wstęp	14
2.2. Prostokątny i trapezowy przebieg prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik sześciopulsowy oraz jego widmo	15
2.3. Widmo prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy przy uwzględnieniu pulsacji prądu obciążenia pros- townika	19
2.4. Weryfikacja pomiarowa metody wyznaczania widma prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy z uwzględnie- niem tętnienia prądu obciążenia	30
2.5. Podsumowanie	34
3. NIECHARAKTERYSTYCZNE HARMONICZNE PRĄDU W UKŁADACH ZASILANIA PROSTOWNIKÓW SZESCIOPULSOWYCH	35
3.1. Wstęp	35
3.2. Wyznaczenie błędów kąta zapłonu	36
3.3. Wyznaczenie nietypowych harmoniczných w prądzie za- silającym prostownik sześciopulsowy	40
3.4. Weryfikacja pomiarowa metody wyznaczania nietypowych harmoniczných prądu zasilającego prostownik zależnie od wielkości błędu kąta zapłonu	46
3.5. Podsumowanie	48
4. ODDZIAŁYWANIE KILKU PROSTOWNIKÓW NA SIEĆ ZASILAJĄCĄ W PUNKCIE ICH WSPÓLNEGO PRZYŁĄCZENIA DO SIECI	50
4.1. Wstęp	50
4.2. Harmoniczne prądu pobierane z sieci zasilającej przez grupowe napędy prostownikowe	51
4.2.1. Harmoniczne prądu pobierane z sieci zasilającej przez dwa prostowniki zasilane z jednego transfor- matora	51

4.2.2. Statystyczne metody określania wyższych harmonicznych prądu pobieranych z sieci zasilającej przez grupowe napędy tyrystorowe	54
4.3. Weryfikacja pomiarowa statystycznych metod określania wypadkowej harmonicznej prądu kilku prostowników . . .	58
4.4. Podsumowanie	61
5. WPŁYW PRACY NAPĘDÓW PROSTOWNIKOWYCH NA KSZTAŁT KRZYWEJ NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO	62
5.1. Wstęp	62
5.2. Metoda wyznaczania współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ zasilającego prostowniki sześciopulsowe .	63
5.3. Weryfikacja pomiarowa metody wyznaczania współczynnika odkształcenia krzywej napięcia	72
5.4. Podsumowanie	75
6. BADANIA PRZEMYSŁOWE WYŻSZYCH HARMONICZNYCH PRĄDU I NAPIĘCIA POBIERANYCH Z SIECI ZASILAJĄCEJ PRZES NAPIĘDY TYRYSTOROWE MASZYN PAPIERNICZYCH	77
6.1. Uwagi ogólne	77
6.2. Pomiar odkształcenia prądów i napięć w układach zasilających napędy tyrystorowe maszyn papierniczych MP-2 w Szczecińskich Zakładach Papierniczych w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Zakładach Celulozy i Papieru w Świeciu	78
6.2.1. Wybór punktów pomiarowych i czasu rejestracji . . .	78
6.2.2. Metodyka badań odkształceń napięcia i prądu zasilającego sześciopulsowe prostowniki mostkowe	84
6.3. Analiza laboratoryjna wykonanych pomiarów	86
7. ANALIZA WYNIKÓW OTRZYMANYCH PODCZAS POMIARÓW W PAPIERNIACH	89
7.1. Warunki pracy tyrystorowych napędów maszyn papierniczych typu PANT oraz TYRAK z uwagi na odkształcenia prądu i napięcia zasilającego	89
7.2. Analiza przebiegów prądów zasilających napędy tyrystorowe typu PANT oraz TYRAK	91
7.2.1. Współczynniki odkształcenia przebiegów napięcia γ i prądu λ badanych maszyn papierniczych	91

7.2.2. Analiza przebiegów prądów zasilających indywidualne napędy tyrystorowe największych mocy typu PANT i TYRAK	95
7.2.3. Analiza przebiegu prądów zasilających grupowe napędy tyrystorowe maszyn papierniczych	101
7.2.4. Analiza prądów przewodowych po stronie 6 kV transformatorów prostownikowych	106
7.3. Analiza przebiegów napięć po stronie 0,4 kV i 6 kV transformatorów zasilających napędy przekształtnikowe	111
7.4. Podsumowanie	114
8. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE	115
LITERATURA	118
 ZAŁĄCZNIK	 123
1. Opis badanych obiektów	123
1.1. Zasilanie napędu tyrystorowego prądu stałego maszyny MP-2 w SZP-Skolwin	123
1.2. Zasilanie napędów tyrystorowych prądu stałego maszyn MP-4 i MP-5 w ZCiP w Świeciu	125
2. Pomiary prądów i napięć zasilających tyrystorowe napędy papiernicze MP-2 w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Świeciu	127
2.1. Lokalizacja punktów pomiarowych	127
2.2. Aparatura użyta podczas pomiarów i obróbki laboratoryjnej	130
3. Dobór mocy poszczególnych sekcji maszyny papierniczej	168

Streszczenie

Przeprowadzono analizę oddziaływania tyrystorowych napędów maszyn papierniczych na sieć wewnętrzną papierni. Wykazano wpływ pracy prostowników sterowanych na generację wyższych harmonicznych prądu i napięć w sieciach zasilających. Podano metody obliczeń wyższych harmonicznych prądu i napięcia generowanych wielosilnikowymi napędami tyrystorowymi maszyn papierniczych.

WYKAZ OZNACZEŃ

A_n	- współczynnik sinusowy szeregu Fouriera
B_n	- współczynnik kosinusowy szeregu Fouriera
$f(n, \gamma)$	- współczynnik korekcyjny przebiegu prądu
F	- rozkład prawdopodobieństwa wektora sumy I_Σ
E_d	- wartość siły elektromotorycznej SEM w obwodzie obciążenia prostownika
$i_W(x)$	- wartość chwilowa prądu we wtórnym uzwojeniu transformatora prostownikowego ($x = \omega t$)
$i_P(x)$	- wartość chwilowa prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora prostownikowego ($x = \omega t$)
$i_{WR}(x), i_{WS}(x), i_{WT}(x)$	- wartość chwilowa prądu we wtórnym uzwojeniu transformatora prostownikowego w fazach R, S, T
i_o	- wartość początkowa prądu prostownika w chwili $t = 0$
I_{W1}	- wartość skuteczna harmonicznnej podstawowej prądu w uzwojeniu wtórnym transformatora prostownikowego
I_{Wn}	- wartość skuteczna harmonicznnej prądu rzędu n w uzwojeniu wtórnym transformatora prostownikowego
I_1, I_n	- wartość skuteczna podstawowej harmonicznnej i wyższych harmonicznnych prądu
$\hat{I}_{\Sigma n}$	- wartość skuteczna sumy prądów harmonicznnych rzędu n kilku prostowników zasilanych z tego samego transformatora
I_{xn}	- wartość skuteczna prądu harmonicznnej rzędu n jednego z N prostowników zasilanych z tego samego transformatora
I_d	- wartość prądu obciążenia prostownika
I_{di}	- wartość idealna prądu obciążenia prostownika
k	- liczba naturalna
K_n	- wartość względna amplitudy harmonicznnej prądu rzędu n , w stosunku do amplitudy harmonicznnej podstawowej,
K_{ob}	- współczynnik obciążenia prostownika w stosunku do obciążenia znamionowego
K_r	- współczynnik uwzględniający rozływ n -tej harmonicznnej w sieci zasilającej

K_Q	- względna wartość idealnej mocy zainstalowanej w prostowniku
K_u	- współczynnik podziału reaktancji komutacyjnej
L_d	- wartość indukcyjności w obwodzie obciążenia prostownika
m	- liczba pulsów prostownika
N	- liczba prostowników
n	- rząd harmonicznego
p	- prawdopodobieństwo
P_{di}	- idealna moc prostownika
P_{zn}	- moc znamionowa prostownika
R	- rezystancja obwodu obciążenia
S_z	- moc zwarcia sieci zasilającej w punkcie przyłączenia prostownika
T_{em}	- elektromagnetyczna stała czasowa obwodu obciążenia
t	- czas
$u(x)$	- wartość chwilowa napięcia zasilającego, ($x = \omega t$)
$u_G(x)$	- wartość chwilowa napięcia zasilającego po stronie generatorów, ($x = \omega t$)
$u_N(x)$	- wartość chwilowa napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia prostownika, ($x = \omega t$)
$u_S(x)$	- wartość chwilowa napięcia zasilającego po wtórnej stronie transformatora prostownikowego, ($x = \omega t$)
U_m	- wartość skuteczna napięcia zasilającego, międzyprzewodowa
U_{1m}	- wartość skuteczna podstawowej harmonicznego napięcia zasilającego międzyprzewodowego
U_n	- wartość skuteczna harmonicznego rzędu n napięcia zasilającego
U_{zn}	- wartość znamionowa napięcia zasilającego
U_{di}	- idealna wartość napięcia wyprostowanego
U_z	- napięcia zwarcia transformatora prostownikowego
X_d	- wartość reaktancji w obwodzie obciążenia prostownika
X_T	- wartość reaktancji transformatora prostownikowego
X_N	- wartość reaktancji sieci zasilającej
X_K	- wartość reaktancji komutacyjnej prostownika
Z_n	- impedancja sieci zasilającej dla n -tej harmonicznego prądu

- α - kąt sterowania prostownika
- α_0 - kąt sterowania prostownika odpowiadający minimalnej wartości kąta komutacji γ
- β - błąd kąta sterowania prostownika
- γ - kąt komutacji
- γ_0 - graniczny kąt komutacji dla $\alpha = 0$
- δ - kąt przesunięcia podstawowej harmonicznego napięcia sieci $u_N(x)$ względem podstawowej harmonicznego napięcia generatorów $u_G(x)$
- ϵ - względna wartość siły elektromotorycznej SEM w obwodzie obciążenia prostownika
- ϑ_z - kąt opóźnienia zapłonu prostownika
- ϑ_w - kąt wyłączenia prostownika
- λ - współczynnik odkształcenia krzywej prądu zasilającego
- ϑ - współczynnik odkształcenia krzywej napięcia zasilającego
- μ - funkcja sterowania prostownika
- φ - kąt fazowy
- φ_{xn} - kąt zawarty między wektorami prądów harmonicznym tego samego rzędu prostowników zasilanych z tego samego transformatora
- $x_{\alpha, \gamma}$ - funkcja mocy biernej
- ψ - kąt obciążenia
- ω - pulsacja sieci zasilającej.

1. WSTĘP

1.1. Uwagi ogólne

Prostowniki tyrystorowe są obecnie bardzo często stosowane w technice napędu elektrycznego. W związku z tym istnieje bogata literatura dotycząca ich teorii i zastosowań [1,2,9]. Posiadają one szereg zalet preferujących je wszędzie tam, gdzie wymagana jest duża stabilność i szeroki zakres zmian prędkości obrotowej. Wymagania takie, szczególnie jeśli chodzi o dużą stabilność prędkości obrotowej, a także dużą dynamikę, stawiane są elektrycznym napędom maszyn papierniczych [10]. Obecnie wszystkie nowo budowane i modernizowane papiernie krajowe i zagraniczne wyposażane są w napędy tyrystorowe. Oprócz szeregu niewątpliwych zalet napędy te posiadają poważne wady, z których do najbardziej niekorzystnych zaliczyć należy oddziaływanie na sieć zasilającą. Przejawia się ono zazwyczaj poprzez duży pobór mocy biernej w trakcie rozruchu i hamowania napędu, z czym wiąże się zagadnienie wahań napięcia sieci. Drugim aspektem niekorzystnego oddziaływania napędu tyrystorowego na sieć zasilającą jest pobieranie znacznie odkształconego prądu oraz zniekształcenie napięcia sieci zasilającej.

W napędach tyrystorowych maszyn papierniczych zagadnienia gospodarki mocą bierną, aczkolwiek są sprawą ważną, nie są jednak dominujące, gdyż napędy te pracują w zasadzie w stanach ustalonych. Inaczej mówiąc nawroty, hamowanie czy rozruch są tu traktowane, jako niecharakterystyczne stany pracy napędów maszyn papierniczych. W związku z powyższym wiodącym zagadnieniem w zakresie oddziaływania tyrystorowych napędów papierniczych na sieć zasilającą jest pobieranie przez te napędy odkształconego prądu i zniekształcenie napięcia zasilającego.

Zjawisko pobierania przez prostowniki z sieci zasilającej odkształconego prądu jest znane od dawna i poświęcono mu wiele opracowań. Dotyczyły one jednak w większości analizy widma prądu zasilającego w przypadku idealnych parametrów układu zasilającego i układu obciążenia prostownika. Można tu wymienić prace Z. Białkiewicza [17], S.N. Rudienki [7] czy też P. Büchnera [20]. Założenia, jakie przyjmowano do analizy, sprowadzały

się do idealnie wygładzonego prądu stałego, tzn. nieskończenie dużej indukcyjności obciążenia prostownika oraz do przyjęcia również nieskończenie dużej mocy zwarciowej systemu zasilającego, co odpowiada pominięciu zjawisk komutacyjnych.

W niektórych pracach uwzględniono wpływ zjawisk komutacyjnych na widmo prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik. Do prac tych zaliczyć można prace G. Möltgena [4], T. Wasserraba [11], R. Lappe [3], A. Czajkowskiego [1].

Wpływ pracy napędu prostownikowego na kształt napięcia zasilającego jest przedmiotem opracowań J. Żezelenki [56] i R. Góreckiego [29,30].

Mimo licznych prac publikowanych z zakresu niekorzystnego oddziaływania napędów tyrystorowych na sieć zasilającą, istnieje tu szereg nie w pełni rozwiązanych problemów o istotnym znaczeniu. Wymienić można chociażby określenie wpływu pulsacji prądu obciążenia na skład i charakter widma prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik. Poza sporadycznie pojawiającymi się publikacjami np. J. Uszakowa [51] czy H. Arremanna [14] brak jest opracowań dotyczących tego tematu.

Kolejnym zagadnieniem, rzadko pojawiającym się w literaturze fachowej, jest problem występowania harmonicznym nietypowych w wyniku pracy prostownika. Do niewielu prac z tego zakresu zaliczyć należy publikacje J. Anisimowa [13] oraz A.G. Phandke [46].

Zagadnienie oddziaływania kilku prostowników zasilanych z tego samego transformatora, a właściwie problem wyznaczania wypadkowej sumy ich harmonicznym poruszane jest przez wąskie grono specjalistów, m.in. przez A. Klossa [33] z firmy Brown-Boveri oraz G. Sieberta [49] z Uniwersytetu w Dreźnie. Ogólnie rzecz ujmując prace dotyczące oddziaływania napędów tyrystorowych na sieć zasilającą podzielić można m.in. na dwie grupy. Do jednej należałoby zaliczyć prace dotyczące ogólnie pojętego napędu tyrystorowego, do drugiej zaś dotyczące konkretnych napędów, najczęściej maszyn wyciągowych lub napędów hutniczych. Szczególne zainteresowanie tymi napędami wynika z wielkości mocy w nich zainstalowanej.

Zagadnienia, sygnalizowane powyżej, są szczególnie istotne przy analizie pracy napędów tyrystorowych maszyn papierniczych.

Napęd tych urządzeń, jak wcześniej wspomniano, musi spełniać duże wymagania odnośnie dynamiki i stabilizacji prędkości obrotowej. Jeśli przy tym moc zainstalowana w takim napędzie jest rzędu 2 MW to problem niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą staje się sprawą ważną. Potwierdzają to również pomiary wykonane przez autora w kilku papierniach w kraju. Należy zaznaczyć, że są to pierwsze i jedyne, jak na razie, badania tego typu przeprowadzone w przemyśle papierniczym w Polsce. Biorąc powyższe pod uwagę, a także fakt braku jakichkolwiek publikacji z zakresu oddziaływania tyrystorowego napędu maszyn papierniczych na sieć zasilającą, autor przyjął następujący temat pracy:

"Analiza oddziaływania tyrystorowych napędów elektrycznych maszyn papierniczych na sieć wewnętrzną papierni".

1.2. Cel, zakres i tezy pracy

Podczas realizacji tematu rozprawy autor postawił sobie za cel przeprowadzenie powyższej analizy w szczególności jeśli chodzi o zagadnienia:

- wpływu pulsacji prądu obciążenia na widmo prądu pobieranego przez prostownik sześciopulsowy z sieci zasilającej,
- wpływu zasilania układów sterowania prostowników sześciopulsowych napięciem odkształconym na widmo prądu pobieranego z sieci zasilającej,
- wyznaczania wypadkowego prądu harmonicznego kilku prostowników zasilanych z tego samego transformatora,
- wyznaczania współczynnika odkształcenia napięcia i widma napięcia zasilającego prostowniki sześciopulsowe.

Autor miał także na uwadze przyszłe praktyczne wykorzystanie opracowanego materiału.

W związku z tak postawionym celem pracy autor przyjął następujące tezy rozprawy:

Teza I:

- Niezbędne jest uwzględnienie pulsacji prądu obciążenia papierniczych napędów tyrystorowych przy wyznaczaniu widma prądu pobieranego przez te napędy z sieci zasilającej, a także przy wyznaczaniu współczynnika odkształcenia krzywej napięcia zasilającego te napędy.

Teza II:

- Przyjmowanie wektorowej sumy prądów harmoniczných pochodzących od poszczególnych prostowników jest konieczne przy analizie oddziaływania papierniczego napędu tyrystorowego na sieć zasilającą.

Dla udowodnienia tych tez przyjęto następujący układ rozprawy. W rozdziale 2 przeprowadzono analizę wpływu pulsacji prądu obciążenia na widmo prądu pobieranego przez elektryczny napęd tyrystorowy z sieci zasilającej. Jako wynik analizy podano zestaw wykresów, na podstawie których w prosty sposób można wyznaczyć widmo prądu zasilającego mając do dyspozycji dane układu zasilającego i układu obciążenia prostownika.

Rozdział 3 dotyczy wyznaczania harmoniczných niecharakterystycznych w oparciu o znajomość widma napięcia zasilającego.

Tematem rozdziału 4 jest zagadnienie wypadkowego oddziaływania na sieć zasilającą kilku prostowników zasilanych z tego samego transformatora. W rozdziale podano także w formie wykresów prosty sposób wyznaczania wektora sumy harmoniczných prądów pochodzących od kilku prostowników.

Określenie współczynnika odkształcenia krzywej napięcia oraz widma napięcia zasilającego jest tematem rozdziału piątego. Współczynnik odkształcenia napięcia γ uzależniono od dwóch innych współczynników charakteryzujących parametry układu zasilającego i układu obciążenia prostownika.

Każdy z powyższych rozdziałów zilustrowany jest wynikami odpowiednich pomiarów.

Tematem rozdziałów 6 i 7 są badania przemysłowe, dotyczące wyższych harmoniczných prądu i napięcia w układach zasilania tyrystorowych napędów maszyn papierniczych. I tak rozdział 6 zawiera metodykę i opis układu pomiarowego, natomiast rozdział 7 stanowi analizę wyników otrzymanych w trakcie pomiarów.

W rozdziale 8 dokonano podsumowania pracy. Przedstawiono w nim wnioski i uwagi końcowe.

W pracy zamieszczono również niektóre pozycje bibliografii dotyczącej oddziaływania prostowników tyrystorowych na sieć zasilającą.

W aneksie do pracy przedstawiono wyniki badań przemysłowych przeprowadzonych w ZCiP w Świeciu i SZP w Skolwinie.

Za swój oryginalny wkład do analizowanego problemu autor uważa, oprócz wykonania wymienionych wcześniej pomiarów (jedynych w Polsce), także opracowanie metody uwzględniania wpływu pulsacji prądu obciążenia prostownika sześciopulsowego na widmo prądu pobieranego z sieci zasilającej, opracowanie metody wyznaczania wypadkowego prądu harmonicznego kilku prostowników zasilanych z tego samego transformatora oraz prace przyczynkowe z zakresu wyznaczania współczynnika odkształcenia napięcia zasilającego prostownik wraz z określeniem wpływu zasilania układów sterowania prostowników sześciopulsowych napięciem odkształconym.

2. WYŻSZE HARMONICZNE PRĄDU POBIERANE Z SIECI ZASILAJĄCEJ PRZEZ PROSTOWNIKI SZEŚCIO- PULSOWE

2.1. Wstęp

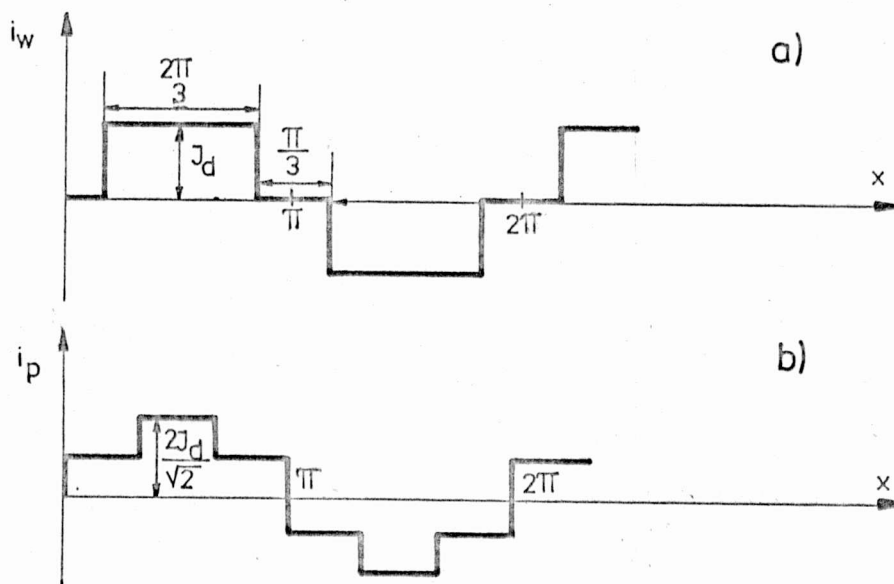
Analizę harmoniczną prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostowniki wykonuje się zwykle dla warunków idealnych, przyjmując, że: indukcyjność obwodu prądu stałego jest nieskończenie duża, komutacja przebiega bezzwłocznie, trójfazowy układ zasilający prądu przemiennego jest symetryczny dla wszystkich harmoniczych, układ sterowania zapłonem jest symetryczny dla każdej fazy, a napięcie zasilające jest symetryczne i sinusoidalne [3,6,17].

W rzeczywistych układach przekształtnikowych zarówno indukcyjność w obwodzie prądu stałego jest ograniczona, jak i komutacja przebiega w pewnym ściśle określonym czasie. Czynniki te mają zasadniczy wpływ na kształt prądu pobieranego z sieci zasilającej, a tym samym na zawartość w nim wyższych harmoniczych. W 1968 r. G. Moltgen zaproponował [39], aby do analizy harmonicznego prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik wprowadzić stosunek (X_d/X_K). Pozwala to uzależnić wyższe harmoniczne pobierane przez prostownik zarówno od parametrów obwodu obciążenia, jak i parametrów układu zasilającego. Badaniami objęte były jednak jedynie prostowniki dwupulsowe pełnosterowne [38], półsterowne [39] oraz szeregowo połączenie dwóch prostowników dwupulsowych dla prądu ciągłego [41] i przerywanego [52]. Badania te wykazały, że stosunek X_d/X_K ma nieoczekiwanie duży wpływ na poziom harmoniczych prądu w sieci zasilającej. Celowym jest zatem zbadanie wpływu tego współczynnika na kształt prądu pobieranego przez prostownik sześciopulsowy z sieci zasilającej.

Krótko omówione zostaną przypadki prostokątnego i trapezowego przebiegu prądu. Natomiast szczegółowo przedstawione będą widma prądów zasilających prostowniki sześciopulsowe rozważane bez dodatkowych założeń upraszczających.

2.2. Prostokątny i trapezowy przebieg prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik sześciopulsowy oraz jego widmo

Jak wcześniej wspomniano widmo prądu zasilającego prostownik tyrystorowy analizuje się często przy założeniu idealnie wygładzonego prądu stałego oraz przy pominięciu zjawisk komutacyjnych. Przy powyższych założeniach prąd pobierany przez pojedynczy mostek tyrystorowy zasilany z sieci prądu przemienego przez transformator o grupie połączeń Dy po jego stronie wtórnej ma postać ciągu impulsów prostokątnych, na przemian dodatnich i ujemnych o szerokościach $2\pi/3$, wysokości I_d i powtarzających się co $\pi/3$ (rys. 2.1).



Rys.2.1. Przebieg prądu po stronie wtórnej a) i pierwotnej b) stronie transformatora przekształtnikowego o grupie połączeń Dy

Widmo takiego przebiegu jest powszechnie znane, jednak dla potrzeb dalszych rozważań zostanie krótko omówione. Rozwinięcie rozpatrywanego przebiegu w szereg Fouriera prowadzi do znanej zależności (rys. 2.1a)

$$\begin{aligned} i_W(x) = \sqrt{2} I_{W1} & \left(\cos x - \frac{1}{5} \cos 5x + \frac{1}{7} \cos 7x - \frac{1}{11} \cos 11x + \right. \\ & + \frac{1}{13} \cos 13x - \frac{1}{17} \cos 17x + \frac{1}{19} \cos 19x - \frac{1}{23} \cos 23x + \\ & \left. + \frac{1}{25} \cos 25x - \dots \right), \end{aligned} \quad (2.1)$$

przy czym

$$I_{W1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2.2)$$

Natomiast przebieg prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora prostownikowego (rys. 2.1b) opisany jest zależnością

$$i_p(x) = \sqrt{2} I_{p1} \left(\cos x + \frac{1}{5} \cos 5x - \frac{1}{7} \cos 7x + \frac{1}{11} \cos 11x + \right. \\ \left. - \frac{1}{13} \cos 13x + \frac{1}{17} \cos 17x - \frac{1}{19} \cos 19x + \frac{1}{23} \cos 23x - \dots \right) \quad (2.3)$$

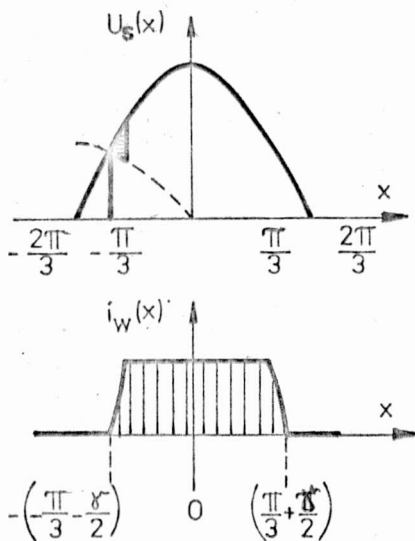
W prądzie pobieranym przez mostek występują zatem jedynie harmoniczne rzędów

$$n = 6k \pm 1 \quad k=1,2,3,\dots \quad (2.4)$$

o względnych wartościach amplitud

$$k_n = \frac{I_{Wn}}{I_{W1}} = \frac{1}{n} \quad (2.5)$$

Przebieg prądu pobieranego przez prostownik sześciopulsowy z sieci zasilającej przy uwzględnieniu komutacji pokazano na rysunku 2.2. Impulsy prądowe mają w tym wypadku kształt zbli-



zony do trapezu. Przyjmując oś symetrii (o) jak na rys. 2.2 analizę Fouriera można ograniczyć do składników cosinusoidalnych, zgodnie z zależnością

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx \, dx$$

Na podstawie rys. 2.2 przebieg prądu opisany jest w następujący sposób:

Rys.2.2. Przebieg prądu i napięcia po wtórnej stronie transformatora prostownikowego o grupie połączeń Dy

$$f(x) = \frac{I_d}{\gamma} \left(x + \frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2} \right) \quad \text{dla} \quad -\frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2} < x < -\frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2}$$

$$f(x) = I_d \quad \text{dla} \quad -\frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2} < x < \frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2}$$

$$f(x) = -\frac{I_d}{\gamma} \left(x - \frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2} \right) \quad \text{dla} \quad \frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2} < x < \frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2}$$

Wykonując całkowanie powyższej zależności można wyznaczyć wartości prądów harmonicznych o rzędach określonych równaniem (2.4)

$$I_{Wn} = \frac{I_d}{\sqrt{2} \pi} \left\{ \gamma^{(-1)} \left[\int_{-\frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2}}^{-\frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2}} \left(x + \frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2} \right) \cos nx \, dx + \right. \right. \\ \left. \left. - \int_{\frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2}}^{\frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2}} \left(x - \frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2} \right) \cos nx \, dx \right] + \int_{-\frac{\pi}{3} + \frac{\gamma}{2}}^{\frac{\pi}{3} - \frac{\gamma}{2}} \cos nx \, dx \right\}$$

Efektem całkowania jest zależność

$$I_{Wn} = \frac{I_d \sqrt{2} \sin n \frac{\pi}{3}}{\pi \cdot n} \frac{\sin n \frac{\gamma}{2}}{n \frac{\gamma}{2}} \quad (2.6)$$

oznaczając

$$\frac{\sin n \frac{\gamma}{2}}{n \frac{\gamma}{2}} = f(n, \gamma) \quad (2.7)$$

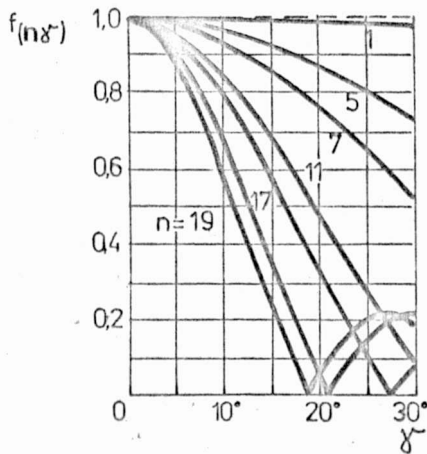
oraz przyjmując, że

$$I_{W1} = \frac{I_d \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{3}}{\pi}$$

ostatecznie otrzymuje się

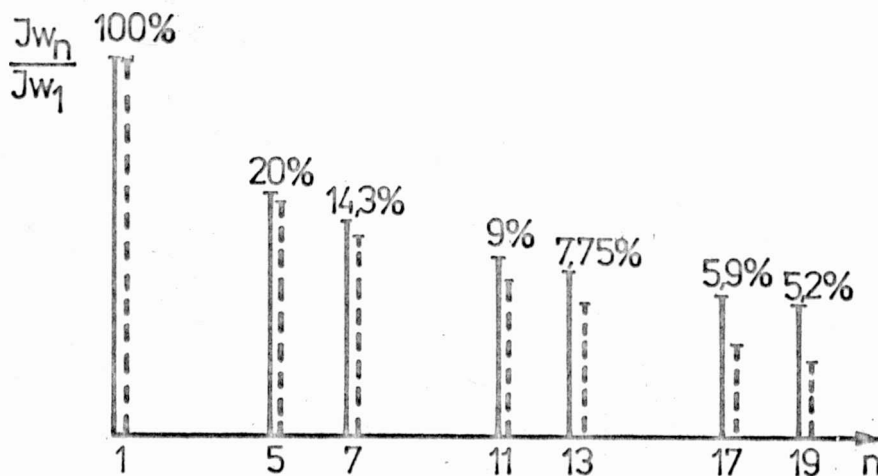
$$\frac{I_{Wn}}{I_{W1}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin n \frac{\gamma}{2}}{n \frac{\gamma}{2}} = k_n \cdot f(n, \gamma) \quad (2.8)$$

Wartość skuteczna prądu I_{Wn} jest więc równa względnej amplitudzie k_n przebiegu prostokątnego pomnożonej przez współczynnik korekcyjny $f(n, \gamma)$. Zależność tego współczynnika od kąta komutacji, dla różnych rzędów harmoniczych, została pokazana na rysunku 2.3. Zjawisko komutacji wpływa więc na zmniejszenie odkształcenia prądu pobieranego z sieci zasilającej. Na rysunku 2.4 pokazano dla porównania widmo prądu zasilającego dla kąta komutacji $\gamma = 0^\circ$ oraz $\gamma = 10^\circ$. Jak widać, dla harmoniczych wyższych rzędów wpływ komutacji zaznacza się się bardziej niż dla rzędów niższych. W rozważaniach powyższych nie uwzględnia się jednak wpływu pulsacji prądu wyjściowego prostownika na odkształcenie prądu sieciowego. Wydaje się, że w tyrystorowych napędach maszyn papierniczych zjawisko to ma zasadnicze znaczenie, gdyż kąty komutacji, z jakimi pracują te napędy są niewielkie rzędu 5° , maksimum 10° , a tym samym wpływ komutacji jest niewielki [45].



Rys.2.3. Zależność współczynnika korekcyjnego $f(n, \gamma)$ od kąta komutacji dla różnych rzędów harmoniczych

są niewielkie rzędu 5° , maksimum 10° , a tym samym wpływ komutacji jest niewielki [45].



Rys.2.4. Widmo prądu zasilającego prostownik dla przypadku idealnego (linia ciągła) i z uwzględnieniem komutacji (linia przerywana)

2.3. Widmo prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy przy uwzględnieniu pulsacji prądu obciążenia prostownika

W rzeczywistych napędach prostownikowych w związku z ograniczoną wartością indukcyjności w obwodzie prądu stałego prąd obciążenia prostownika ma charakter pulsujący. Zjawisko to ma zasadniczy wpływ na widmo prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik. Prostowniki, jak wiadomo, wyposażone są zwykle w dławiki komutacyjne, w związku z czym kąt komutacji γ jest różny od zera. Czynniki te są szczególnie istotne w napędach elektrycznych maszyn papierniczych, gdyż ze względu na wymaganą dużą dynamikę układu napędy te pozbawione są dławików wygładzających w obwodach obciążenia, posiadają natomiast dławiki komutacyjne.

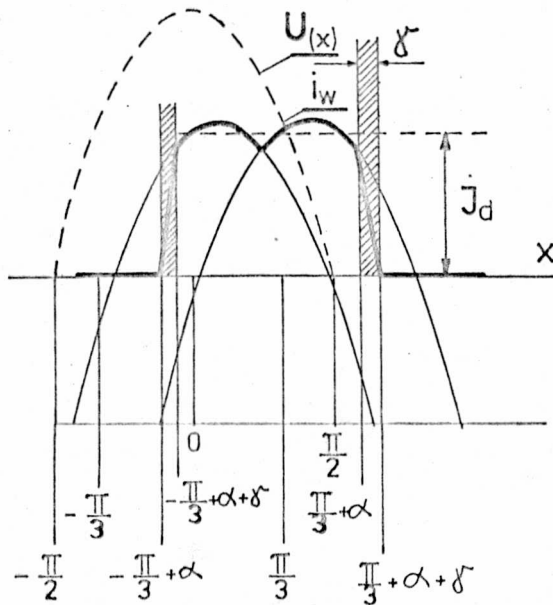
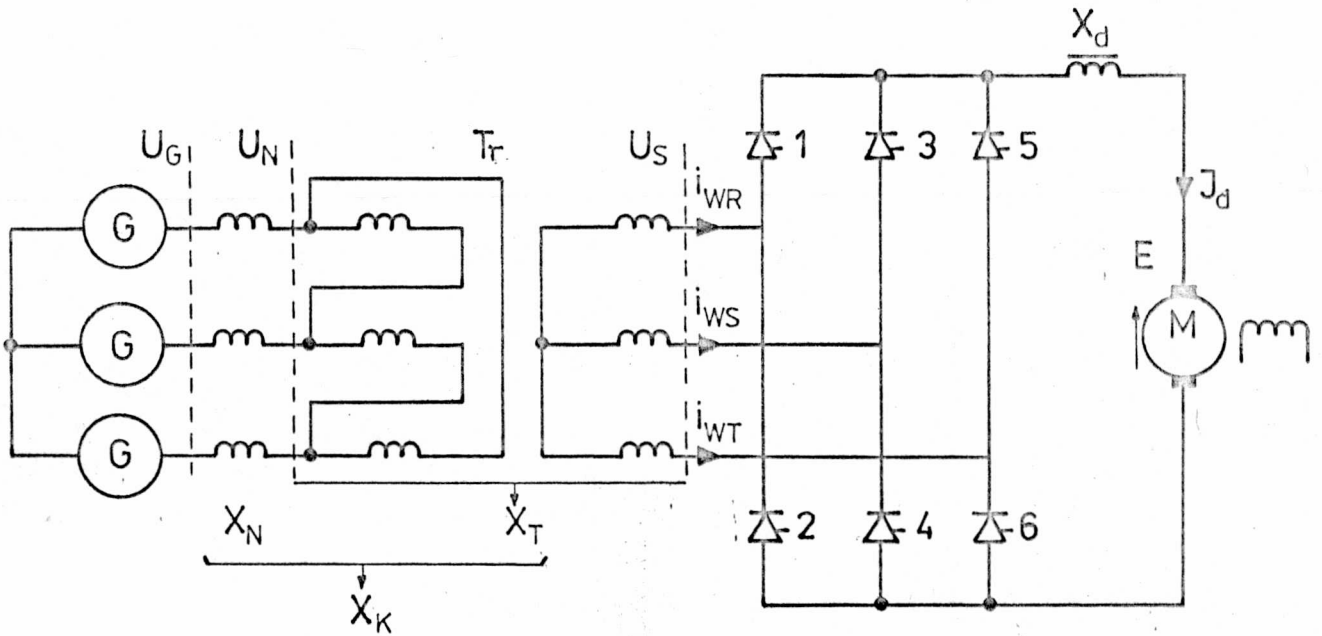
Na rysunku 2.5 przedstawiono schemat ideowy prostownika sześciopulsowego zasilanego z transformatora o grupie połączeń Dy oraz przebieg prądu $i_W(x)$ w uzwojeniu wtórnym transformatora w dowolnej fazie. Jak widać przebieg ten może znacznie odbiegać od przebiegów pokazanych na rysunkach 2.1 i 2.2. W praktyce kąt komutacji określany jest przez wielkość reaktancji komutacyjnej X_K . Pulsacja prądu obciążenia napędu prostownikowego zależy jednak nie tylko od wielkości reaktancji obciążenia X_d , jak się to przeważnie przyjmuje, lecz od sumy $X_d + 2X_K$ reaktancji w obwodzie obciążenia i reaktancji komutacyjnej. Kształt prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik sześciopulsowy, a tym samym jego widmo zależą więc od stosunku reaktancji obciążenia X_d do reaktancji komutacyjnej X_K , co zauważono już w punkcie 2.1. Przyjmując, że komutują grupy trzech lub dwóch zaworów oraz, że napięcia fazowe zasilające prostownik wynoszą odpowiednio

$$u_R = U_m \cos x,$$

$$u_S = U_m \cos \left(x - \frac{2\pi}{3} \right),$$

$$u_T = U_m \cos \left(x + \frac{2\pi}{3} \right),$$

można zapisać równania prądów obciążenia $i_d(x)$ oraz komutacji $i_k(x)$



Rys.2.5. Schemat ideowy prostownika sześciopulso-
wego oraz przebieg prądu
w dowolnej fazie, gdzie:
G - generatory,
M - silnik obcowzbudny
prądu stałego,
1,2,3 do 6 - zawory w po-
szczególnych gałęziach
mostka

- w przedziale komutacji

$$\frac{d}{dx} i_d(x) = \frac{1}{\frac{2}{3} \frac{X_d}{X_K} + 1} (\sqrt{3} U_m \cos x - 2E_d) \cdot \frac{1}{3X_K}$$

$$\frac{d}{dx} i_K(x) = \frac{1}{X_K} \sqrt{3} U_m \sin x, \quad (2.9)$$

$$i_K(x) = i_{WB}(x) - i_{WC}(x),$$

- poza przedziałem komutacji

$$\frac{d}{dx} i_d(x) = \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{X_d}{X_K} + 1} (\sqrt{3} U_m \sin x - E_d) \frac{1}{2X_K} . \quad (2.10)$$

Rozwiązując powyższe równania określono chwilowe wartości prądu obciążenia $i_d(x)$ oraz prądu komutacji $i_K(x)$ w czasie komutacji

$$i_{d(k)}(x) = A_1 + 3 a_1 \sin x - 2a_1 E_d^* x$$

$$i_K(x) = A_3 - a_3 \cos x \quad (2.11)$$

i poza okresem komutacji

$$i_d(x) = A_2 - a_2 \cos \left(x + \frac{\pi}{3}\right) - a_2 E_d^* x \quad (2.12)$$

gdzie A_1, A_2, A_3 - stałe całkowania

$$a_1 = \frac{\sqrt{3} U_m}{\left(\frac{2}{3} \frac{X_d}{X_K} + 1\right) 3X_K}, \quad a_2 = \frac{\sqrt{3} U_m}{\left(\frac{1}{2} \frac{X_d}{X_K} + 1\right) 2X_K}, \quad a_3 = \frac{\sqrt{3} U_m}{X_K}, \quad (2.13)$$

gdzie oznaczono

$$E_d^* = \frac{E_d}{\sqrt{3} U_m} .$$

Prąd obciążenia w czasie komutacji oznaczono przez $i_{d(k)}(x)$, natomiast poza przedziałem komutacji przez $i_d(x)$. W celu określenia stałych całkowania A_1, A_2, A_3 oraz wielkości E_d^* skorzystano z zależności [51]

$$i_{d(k)}\left(-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma\right) = i_d\left(-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma\right), \quad i_K\left(-\frac{\pi}{3} + \alpha\right) =$$

$$= -i_{d(k)}\left(-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma\right)$$

$$i_d\left(-\frac{\pi}{3} + \alpha\right) = i_{d(k)}\left(+\frac{\pi}{3} + \alpha\right), \quad i_K\left(-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma\right) =$$

$$= i_{d(k)}\left(-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma\right)$$

Wyznaczone na podstawie tych założeń stałe wynoszą

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\sqrt{3}}{2} a_1 \left[\sin(\alpha + \gamma) - \sin \alpha \right] + (a_3 + 2a_1 E_d^*) \alpha + (a_3 + a_1 E_d^*) \gamma, \\ A_2 &= \frac{\sqrt{3}}{2} a_1 \left[\sin(\alpha + \gamma) + \sin \alpha \right] + a_2 \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + E_d^* (a_1 \gamma + a_2 \alpha) + a_3 (\alpha + \gamma), \\ A_3 &= -\frac{\sqrt{3}}{2} a_1 \left[\sin(\alpha + \gamma) + \sin \alpha \right] - a_1 \gamma E_d^*, \\ E_d^* &= \frac{\sqrt{3}}{2\gamma} \left[\sin(\alpha + \gamma) - \sin \alpha \right] + \frac{1}{2} b_2 \left[\frac{\cos(\alpha + \gamma) - \cos \alpha}{2b_1 - b_2} \right]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Prądy zasilające prostownik sześciopulsowy w poszczególnych fazach określone są następująco:

- w przedziale komutacji

$$i_{WR} = i_d(k); \quad i_{WS} = \frac{1}{2} (i_d(k) - i_k); \quad i_{WT} = -\frac{1}{2} (i_d(k) + i_k) \quad (2.15)$$

- natomiast poza przedziałem komutacji

$$i_{WR} = i_d, \quad i_{WT} = -i_d \quad (2.16)$$

W celu wyznaczenia widma prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy przebieg prądu w fazie R rozwinięto w szereg Fouriera. Założono przy tym, że trójfazowy układ zasilający jest symetryczny dla wszystkich harmoniczných.

Korzystając z trygonometrycznej postaci szeregu Fouriera można napisać, że

$$i_{WR}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (I'_{WRn} \cos nx + I''_{WRn} \sin nx) \quad (2.17)$$

Współczynniki Fouriera w zależności (2.17) określone są całkami

$$I'_{WRn} = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} i_{WR}(x) \cos nx \, dx, \quad (2.18)$$

$$I_{WRn}'' = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} i_{WR}(x) \sin nx \, dx, \quad (2.18)$$

Dla uproszczenia obliczeń w tabeli 2.1 podano równania prądu fazy R obowiązujące w poszczególnych przedziałach pracy prostownika.

T a b e l a 2.1

Równania prądu $i_{WR}(x)$ fazy R w różnych przedziałach pracy prostownika

Przedział pracy prostownika	Równanie prądu $i_{WR}(x)$ fazy R
$-\frac{\pi}{3} + \alpha < x < -\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma$	$a_1 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(x + \frac{\pi}{3}) - E_d^*(x + \frac{\pi}{3}) \right] - \frac{a_3}{2} \cos(x + \frac{\pi}{3}) + \frac{A_1 + A_3}{2}$
$-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma < x < \alpha$	$-a_2 \left[\cos(x + \frac{2\pi}{3}) - E_d^*(x + \frac{\pi}{3}) \right] + A_2$
$\alpha < x < \alpha + \gamma$	$a_1 \left[\sqrt{3} \sin x - 2E_d^* x \right] + A_1$
$\alpha + \gamma < x < \alpha + \frac{\pi}{3}$	$-a_2 \left[\cos(x + \frac{\pi}{3}) - E_d^* x \right] + A_2$
$\frac{\pi}{3} + \alpha < x < \frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma$	$a_1 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(x - \frac{\pi}{3}) - E_d^*(x - \frac{\pi}{3}) \right] + \frac{a_3}{2} \cos(x - \frac{\pi}{3}) + \frac{A_1 - A_3}{2}$
$\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma < x < \frac{2\pi}{3} + \alpha$	0

Po wykonaniu całkowania otrzymano

$$I_{WRn}' = \frac{2}{\pi n} \left\{ B_7 \cos n\psi + B_8 \sin n\psi + \frac{n}{n+1} B_5 \sin(n+1)\psi + \right. \\ \left. - \frac{n}{n-1} B_6 \sin(n-1)\psi - B_9 \right\} \quad (2.19)$$

(2.19)

$$I_{WRn}'' = \frac{2}{\pi n} \left\{ B_7 \sin n \psi - B_8 \cos n \psi - \frac{n}{n+1} B_5 \cos(n+1) \psi + \right. \\ \left. + \frac{n}{n-1} B_6 \cos(n-1) \psi + B_{10} \right\}$$

gdzie stałe

$$B_1 = 3A_1 - 6E_d^* a_1 \alpha,$$

$$B_2 = 2A_3 \sin n \frac{\pi}{3} + \frac{6}{n} E_d^* a_1,$$

$$B_3 = 4 \cos \frac{n\pi}{6} (E_d^* a_1 \frac{1}{n} - A_2),$$

$$B_4 = -4 \cos \frac{n\pi}{6} E_d^* a_2 \frac{1}{n},$$

$$B_5 = (\frac{3\sqrt{3}}{2} a_1 - a_3 \sin \frac{n\pi}{2}) \sin(n+1) \frac{\gamma}{2} - 2a_2 \cos \frac{n\pi}{6} \sin(n+1) \cdot \\ \cdot (\frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{6}),$$

$$B_6 = (\frac{3\sqrt{3}}{2} a_1 + a_3 \sin \frac{n\pi}{2}) \sin(n-1) \frac{\gamma}{2} - 2a_2 \cos \frac{n\pi}{6} \sin(n-1) \cdot \\ \cdot (\frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{6}),$$

$$B_7 = B_1 \sin \frac{n\gamma}{2} + B_3 \sin n(\frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{6}),$$

$$B_8 = B_2 \sin \frac{n\gamma}{2} + B_4 \sin n(\frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{6}),$$

$$B_9 = 3E_d^* a_1 \gamma \cos n(\alpha + \gamma) + 2E_d^* a_2 \cos \frac{n\pi}{6} \left[\frac{\pi}{3} \sin n(\alpha + \frac{\pi}{6}) + \right. \\ \left. - \gamma \sin n(\alpha + \gamma - \frac{\pi}{6}) \right],$$

$$B_{10} = 3E_d^* a_1 \gamma \cos n(\alpha + \gamma) + 2E_d^* a_2 \cos \frac{n\pi}{6} \left[\frac{\pi}{3} \cos n(\alpha + \frac{\pi}{6}) + \right. \\ \left. - \gamma \cos n(\alpha + \gamma - \frac{\pi}{6}) \right],$$

$$B_{11} = \frac{\sqrt{3}}{4} \left[\sin n\gamma (3a_1 + a_3 - 2a_2) + 2a_2 \frac{\pi}{3} \right],$$

$$\psi = \alpha + \frac{\gamma}{2}.$$

Amplitudy harmonicznego prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy są pierwiastkiem z sumy kwadratów współczynników sinusoidalnych i kosinusoidalnych szeregu Fouriera

$$I_{WRn} = \sqrt{(I'_{WRn})^2 + (I''_{WRn})^2} \quad (2.20)$$

Po podstawieniu (2.19) do (2.20) otrzymano

$$I_{WRn} = \frac{2}{\pi n} \sqrt{B_7^2 + B_8^2 + B_9^2 + B_{10}^2 + \left(\frac{n}{n+1} B_5\right)^2 + \left(\frac{n}{n-1} B_6\right)^2 + 2B_7 \sin \psi \left(\frac{n}{n+1} B_5 + \right. \\ \left. + \frac{n}{n-1} B_6\right) + 2B_8 \cos \psi \left(\frac{n}{n+1} B_5 - \frac{n}{n-1} B_6\right) - \frac{2n^2}{n^2-1} B_5 B_6 \cos 2\psi + \\ \left. + 2\sin n\psi (B_7 B_{10} - B_8 B_9) - 2\cos n\psi (B_7 B_9 + B_8 B_{10}) - \frac{2n}{n+1} B_5 \cdot \right. \\ \left. \left[B_9 \sin(n+1)\psi - B_{10} \cos(n+1)\psi \right] + \frac{2n}{n-1} B_6 \left[B_9 \sin(n-1)\psi + B_{10} \cos(n-1)\psi \right] \right} \quad (2.21)$$

Dla $n=1$ współczynniki I'_{WR1} i I''_{WR1} oraz I_{WR1} należy obliczyć odrębnie. Jako rozwiązanie otrzymuje się wzory określające amplitudy składników harmonicznego podstawowej

$$I'_{WR1} = \frac{2}{\pi} (B_7 \cos \psi + B_8 \sin \psi + \frac{1}{2} B_5 \sin 2\psi - B_9), \quad (2.22)$$

$$I''_{WR1} = \frac{2}{\pi} (B_7 \sin \psi - B_8 \cos \psi - \frac{1}{2} B_5 \cos 2\psi + B_{10} + B_{11}).$$

Na podstawie zależności (2.22) wartość skuteczna pierwszej harmonicznego prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik sześciopulsowy wynosi

$$I_{WR1} = \frac{2}{\pi} \sqrt{B_7^2 + B_8^2 + \frac{1}{4} B_5^2 + B_9^2 + (B_{10} + B_{11})^2 + 2\sin \psi \left[B_7 \left(\frac{1}{2} B_5 + B_{10} + B_{11} \right) + \right. \\ \left. - B_8 B_9 \right] + 2\cos \psi \left[B_8 \left(\frac{1}{2} B_5 - B_{10} - B_{11} \right) - B_7 B_9 \right] - B_5 \left[B_9 \sin 2\psi + \right. \\ \left. + \cos 2\psi (B_{10} + B_{11}) \right]} \quad (2.23)$$

Zależności (2.21) i (2.23) dotyczą widma prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy dla ciągłego prądu obciążenia. Jest to wystarczające dla tyrystorowych napędów maszyn papierniczych. Napędy te, poza stanami przejściowymi takimi jak rozruch, hamowanie, pracują w warunkach, gdy prąd obciążenia jest ciągły [10,44]. Dla pokazania wpływu pulsacji prądu obciążenia na widmo prądu zasilającego wykreślono, na podstawie uzyskanych równań (2.21) i (2.23), krzywe zależności zawartości poszczególnych harmonicznych k_n od X_d/X_K dla różnych wartości napięcia zwarcia U_Z transformatora prostownikowego. Krzywe te przedstawiono na rysunkach 2.6-2.8.

Przyjęto wartości napięcia zwarcia $u_Z=5\%, 10\%, 15\%$ jako najczęściej spotykane w napędach elektrycznych maszyn papierniczych [41]. Dla przyjętych wartości u_Z wyznaczono wartości reaktancji komutacji X_K . Należy zaznaczyć, że nie jest w tym wypadku istotne jak dzieli się reaktancja X_K na reaktancję sieci i transformatora prostownikowego lub dławików komutacyjnych.

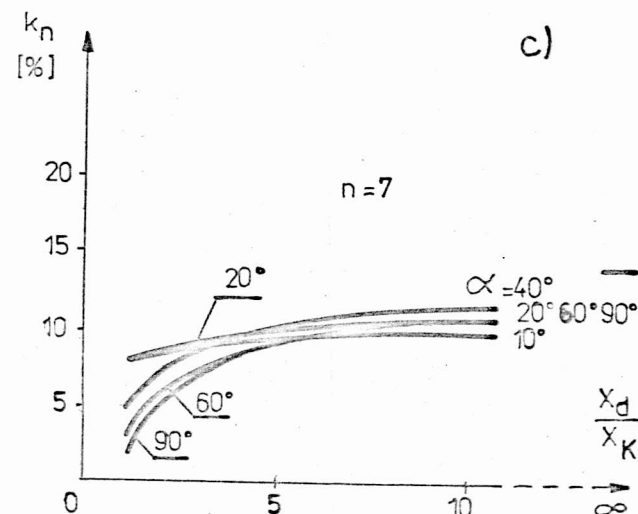
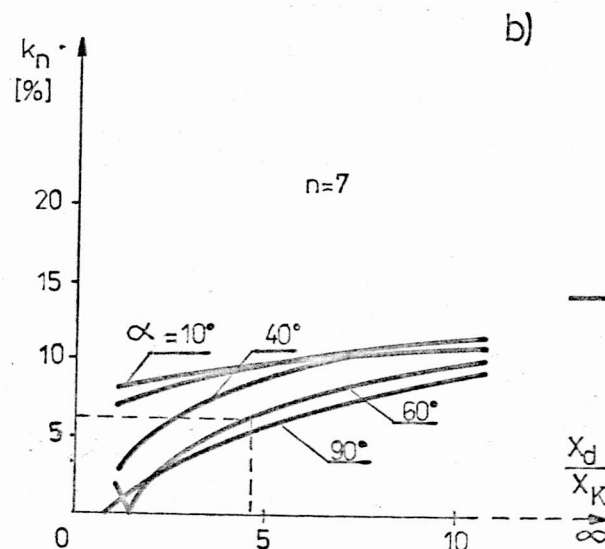
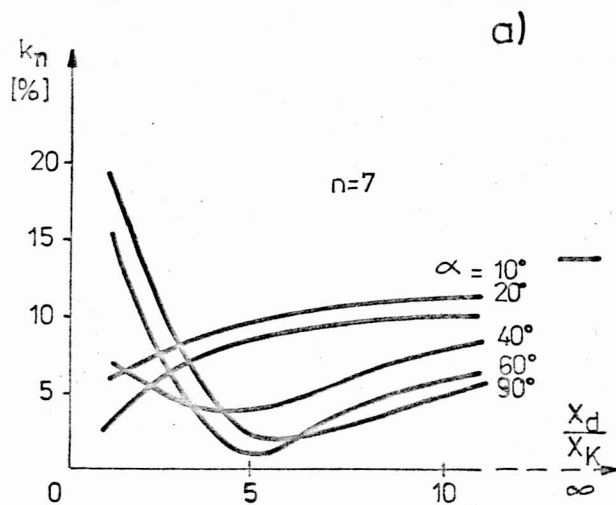
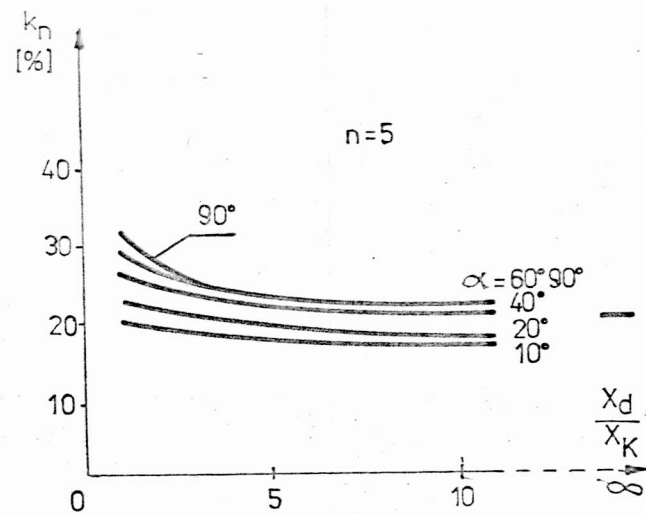
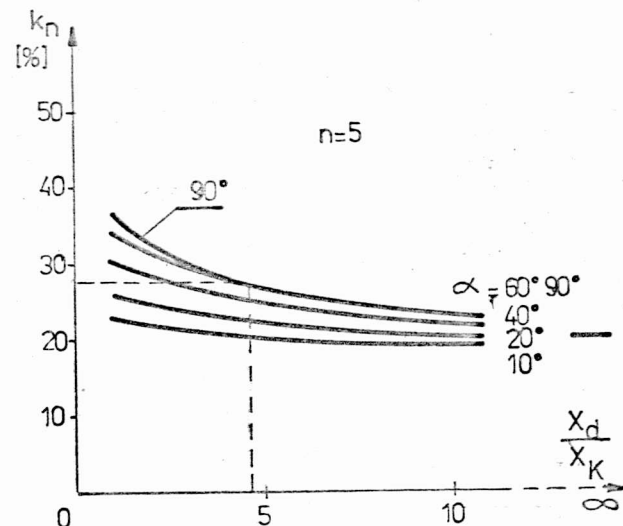
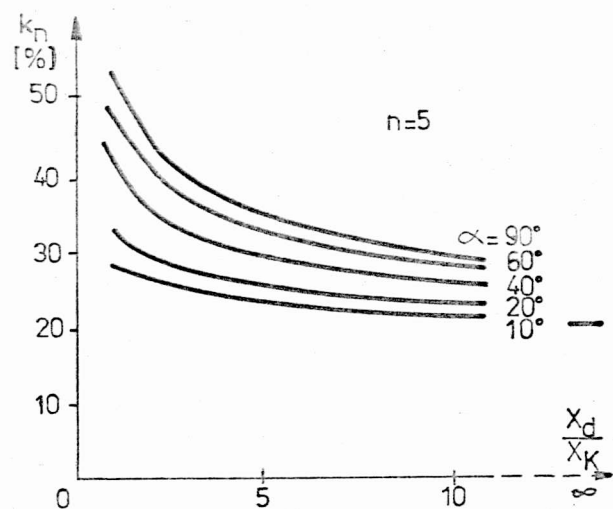
Na pierwszy rzut oka trudno uchwycić jakąś zależność między widmem prądu zasilającego a stosunkiem X_d/X_K . Można jednak na podstawie tych rysunków wysnuć następujące wnioski:

dotyczy 5-tej harmonicznej:

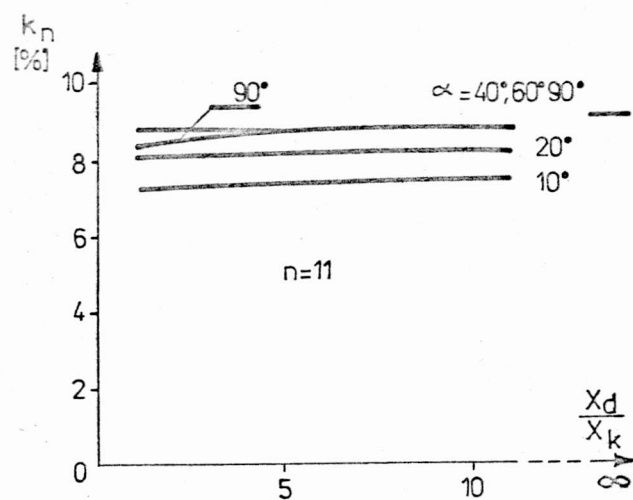
- amplitudy piątych harmonicznych są większe, a w zakresie niewielkich wartości stosunku X_d/X_K (granica przewodzenia ciągłego) dużo większe od teoretycznej wartości 20% (wg 2.5),
- ze wzrostem napięcia zwarcia u_Z , a tym samym reaktancji komutacyjnej X_K amplitudy piątych harmonicznych zmniejszają się, potwierdza to wniosek z p. 2.2,
- ze wzrostem kąta sterowania α amplitudy piątej harmonicznej również zwiększają się;

dotyczy 7-mej harmonicznej:

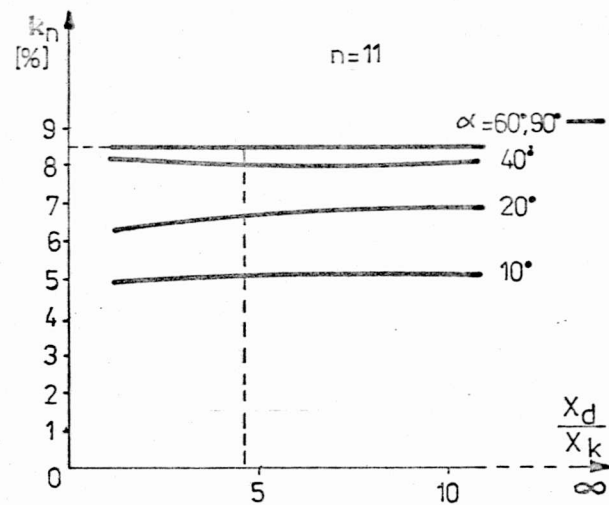
- amplitudy siódmych harmonicznych posiadają minimum, które zależy od wielkości reaktancji komutacji X_K przesuwają się w kierunku osi rzędnych dla mniejszych wartości X_K ,
- dla X_d/X_K zmieniającego się w szerokim zakresie, amplitudy siódmych harmonicznych są mniejsze od teoretycznej wartości 14,3% (wg 2.5),



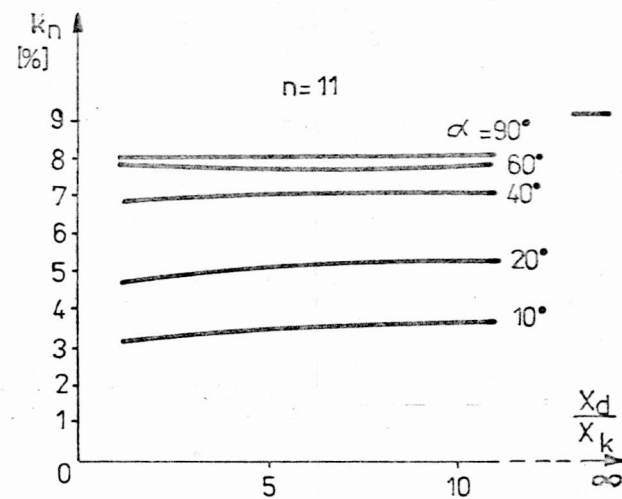
Rys.2.6. Krzywe zależności względnych wartości amplitud k_n piątej i siódmej harmonicznej prądu od stosunku X_d/X_K dla a) $u_z=5\%$, b) $u_z=10\%$, c) $u_z=15\%$



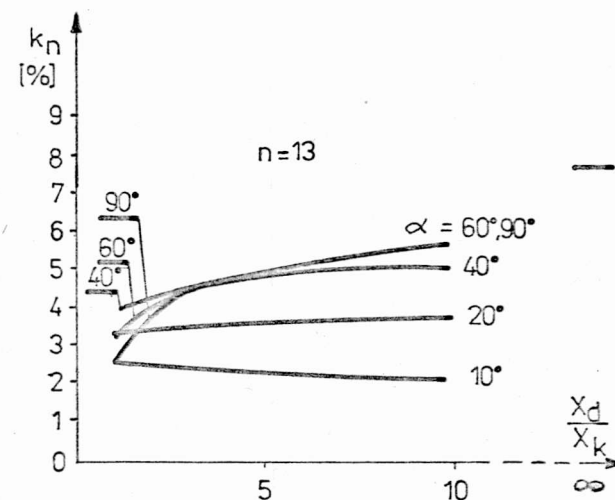
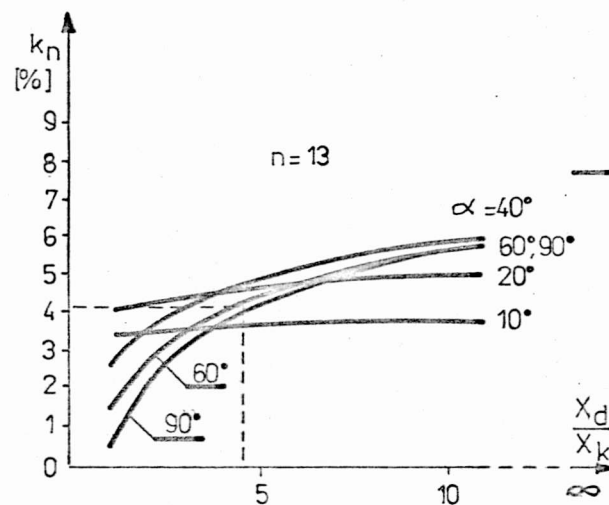
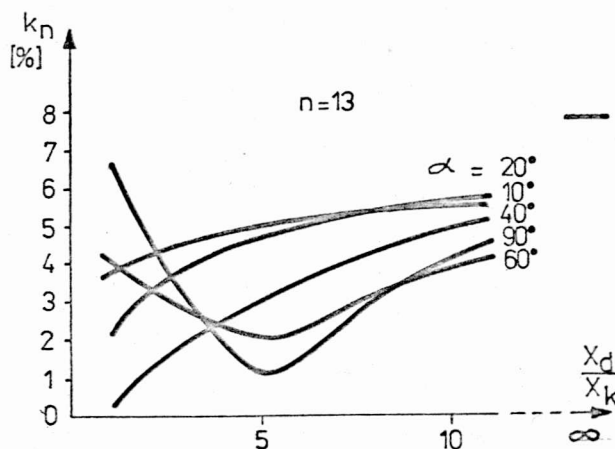
a)



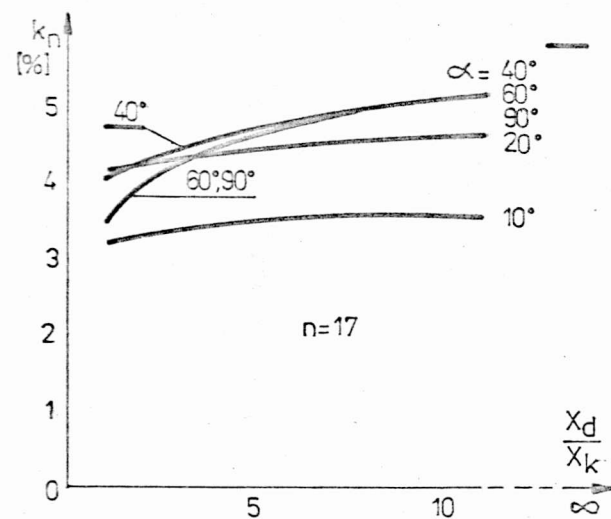
b)



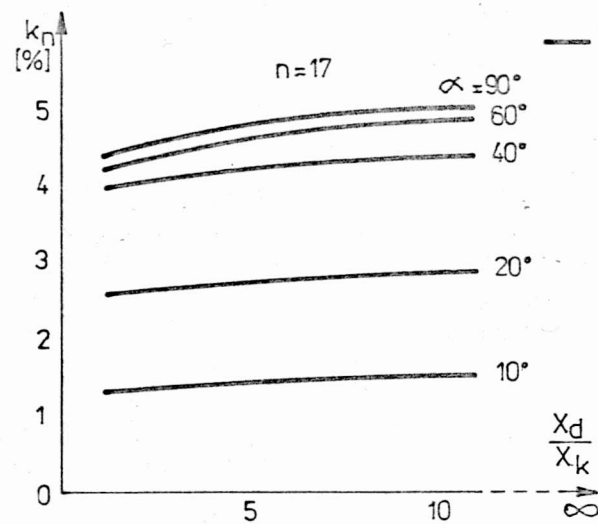
c)



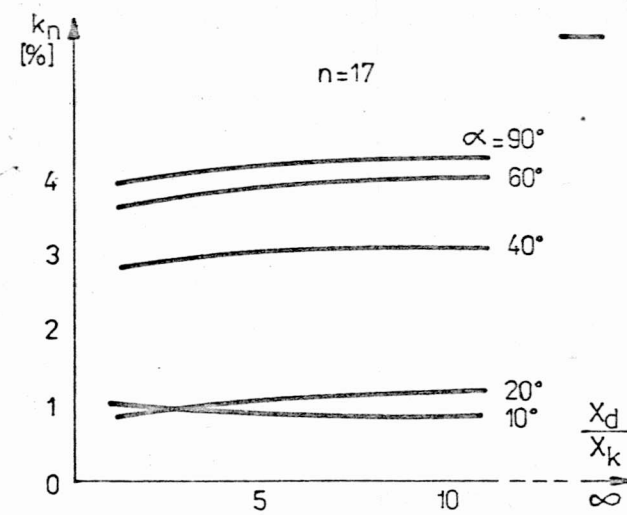
Rys.2.7. Krzywe zależności względnych wartości amplitud k_n jedenastej i trzynastej harmonicznej prądu zasilającego od stosunku X_d/X_k dla a) $u_z=5\%$, b) $u_z=10\%$, c) $u_z=15\%$



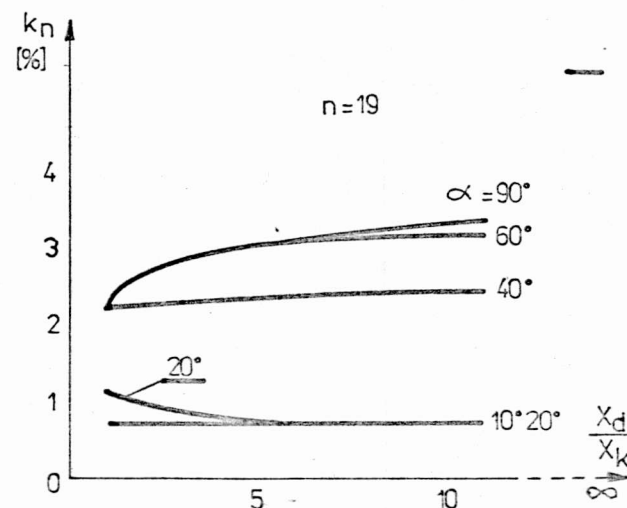
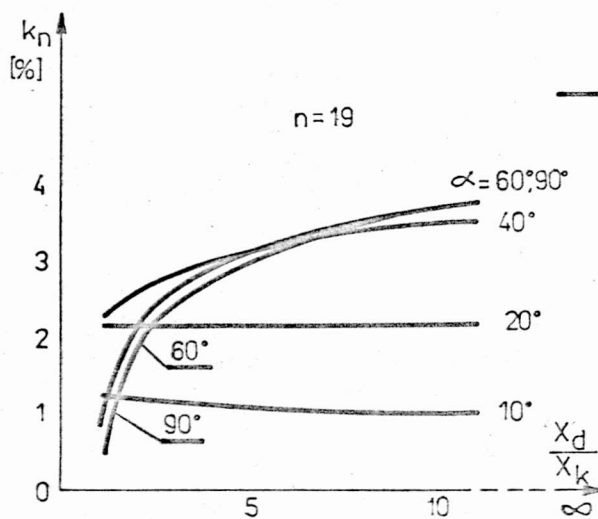
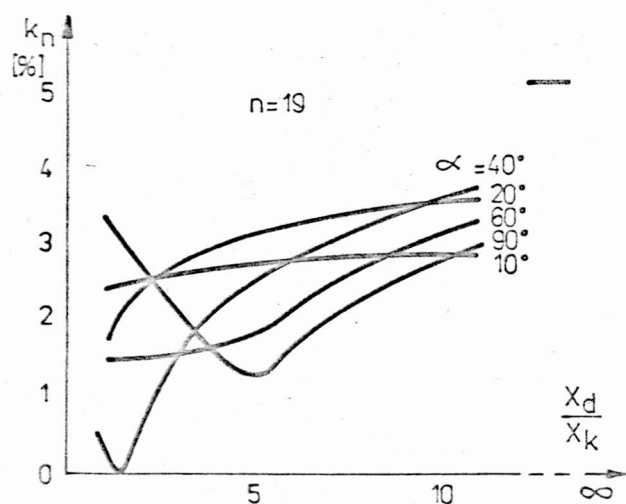
a)



b)



c)



Rys.2.8. Krzywe zależności względnych wartości amplitud k_n siedemnastej i dziewiętnastej harmonicznej prądu zasilającego od stosunku X_d/X_k dla a) $u_z=5\%$, b) $u_z=10\%$, c) $u_z=15\%$

- ze wzrostem kąta sterowania α amplitudy siódmej harmonicznej maleją,

dotyczy 11-tej harmonicznej

- amplitudy jedenastych harmonicznych praktycznie nie zależą od wielkości X_d/X_K , zależą natomiast od kąta sterowania α , i wraz z jego wzrostem zwiększają się,
- dla X_d/X_K zmieniającego się w szerokim zakresie amplitudy jedenastych harmonicznych są mniejsze od teoretycznej wartości 9,1% (wg 2.5),
- dla 13-tej harmonicznej analizowane krzywe mają taki sam charakter jak dla siódmej harmonicznej.

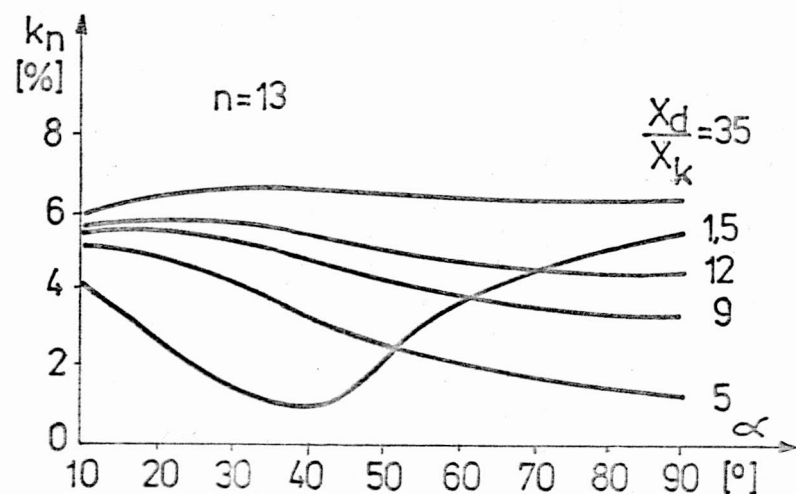
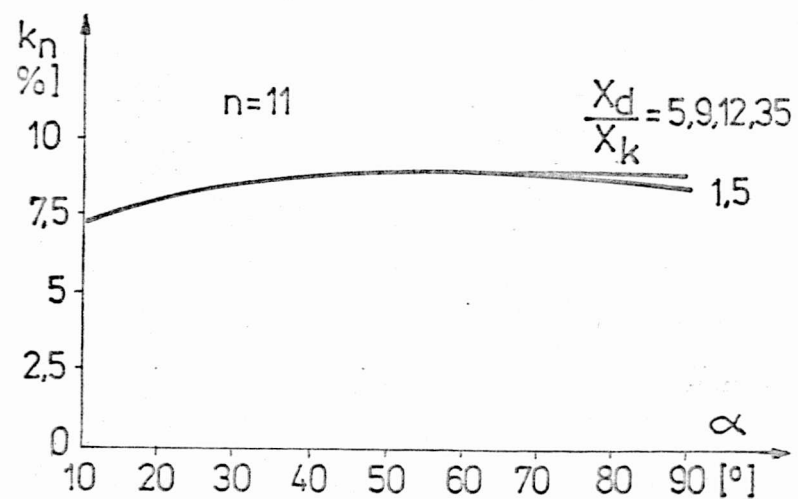
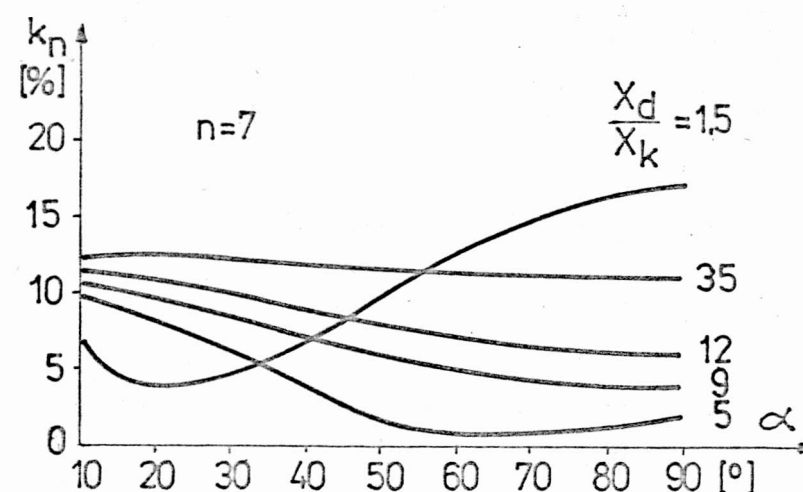
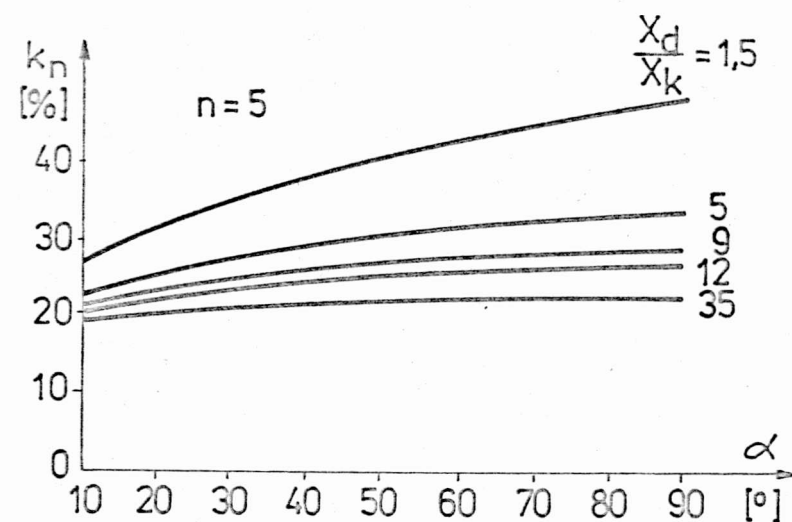
Potwierdzeniem powyższych wniosków są również krzywe zależności względnych amplitud harmonicznych prądu od kąta sterowania α dla różnych wartości stosunku X_d/X_K przedstawione na rysunku 2.8. Krzywe te dotyczą napięcia zwarcia $u_z=5\%$. Ogólnie amplitudy wyższych harmonicznych, z wyjątkiem piątej harmonicznej, są mniejsze od ich teoretycznych wartości określonych zależnością (2.5). Amplitudy harmonicznych rzędów $n=6k-1$ wraz ze wzrostem kąta sterowania α zwiększają się, natomiast rzędów $n=6k+1$ zmniejszają się. Charakter krzywych rzędów $n=5, 11, 17 \dots$ jest zbliżony do siebie, odnosi się to również do harmonicznych rzędów $n=7, 13, 19 \dots$.

W celu oceny przydatności powyższej analizy do celów praktycznych należy przeprowadzić jej weryfikację pomiarową. Jest to tematem następnego rozdziału.

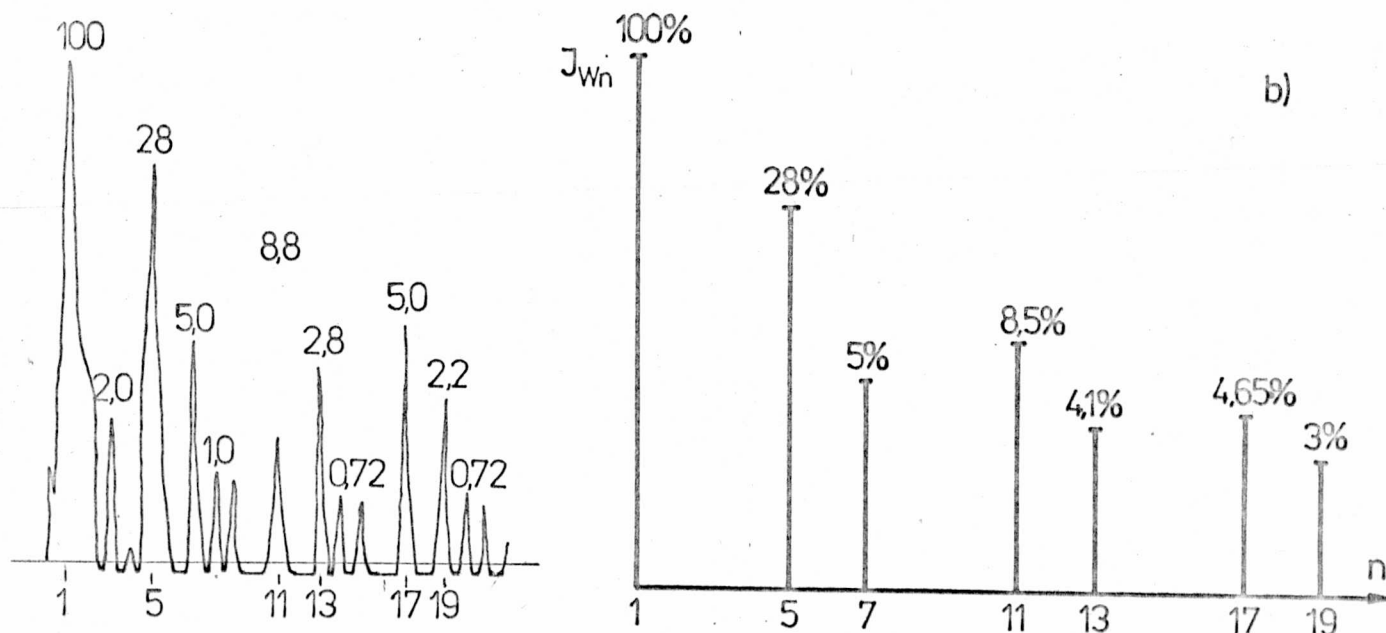
2.4. Weryfikacja pomiarowa metody wyznaczania widma prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy z uwzględnieniem tętnienia prądu obciążenia

W celu weryfikacji pomiarowej zaproponowanej metody wyznaczania widma prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy skorzystano z wyników pomiarów wykonanych na krajarcie zwojów maszyny papierniczej MP-IV w Świeciu.

Na rysunku 2.9a przedstawiono widmo rzeczywistego przebiegu prądu zasilającego napęd krajarki, natomiast na rysunku 2.9b widmo wyznaczone na podstawie zaproponowanej metody. Do obliczeń X_d i X_K przyjęto parametry układu rzeczywistego, tzn. napięcie



Rys.2.8. Krzywe zależności względnych wartości amplitud harmonicznych 5, 7, 11 i 13-go rzędu od kąta sterowania α dla różnych wartości stosunku X_d/X_k , napięcie zwarcia $u_z=5\%$



Rys.2.9. Widmo prądu i w fazie 5 zasilającego napęd tyrystorowy krajarki zwojów MP-IV w Świeciu: a) widmo przebiegu rzeczywistego, b) widmo wyznaczone na podstawie obliczeń

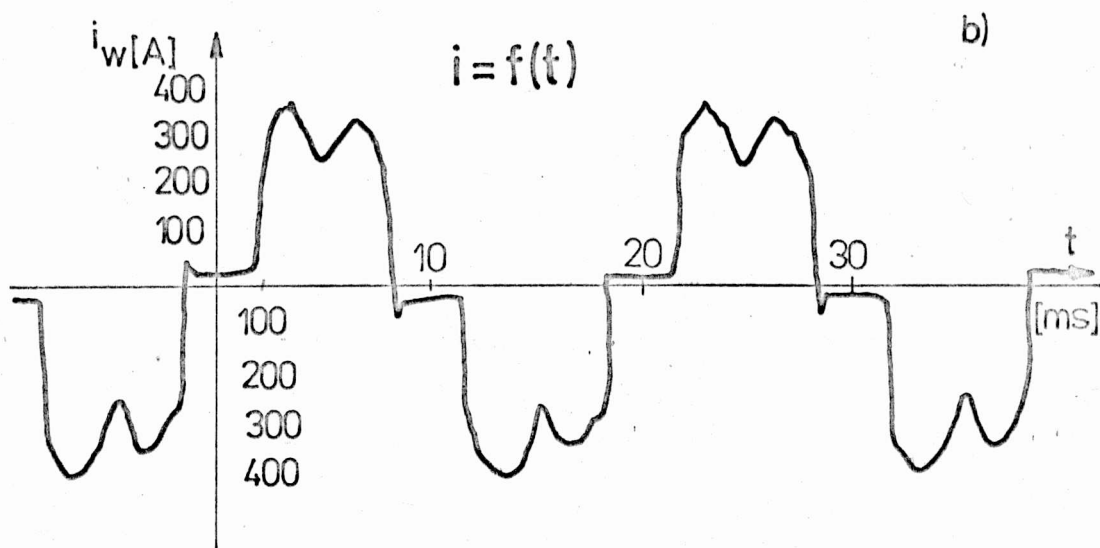
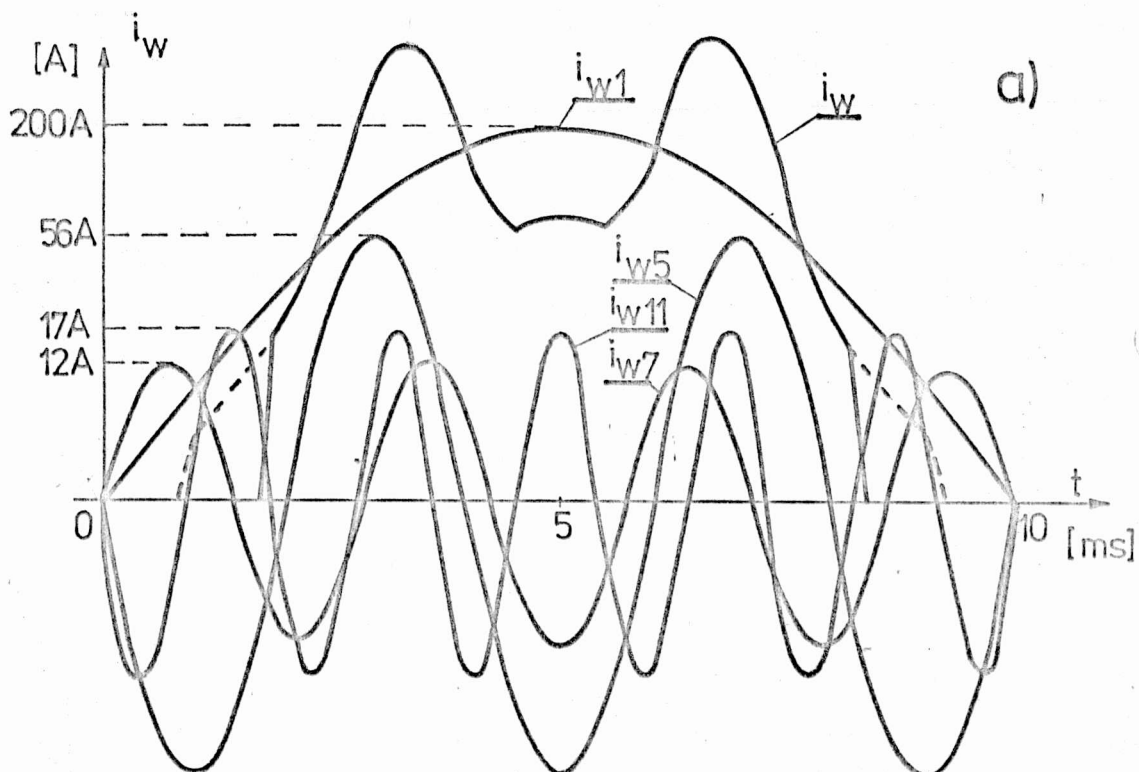
zwarcia transformatora prostownikowego $u_z=10\%$, wartości prądu w obwodzie obciążenia $I_d=270$ A, wartość skuteczną napięcia zasilającego po stronie zaworów 380 V, kąt sterowania $\alpha=60^\circ$. Na tej podstawie wyznaczono stosunek X_d/X_K . Jego wartość wynosi

$$\frac{X_d}{X_K} = \frac{0,79}{0,17} \frac{\Omega}{\Omega} = 4,65$$

Do tak wyznaczonego stosunku X_d/X_K z rysunków 2.6b, 2.7b i 2.8b odczytano względne wartości amplitud harmoniczných 5, 7, 11, 13, 17, 19, a następnie sporządzono widmo prądu zasilającego, przedstawione na rysunku 2.9b.

Z porównania widma wyznaczonego analitycznie oraz widma rzeczywistego przebiegu prądu zasilającego krajarkę zwojów MP-IV w Świeciu wynika, że uzyskano dużą zbieżność wyników. Różnica między amplitudami harmoniczných wyznaczonymi analitycznie i rzeczywistą wartością tych amplitud nie przekracza 20%. Przyjmując, że błąd pomiaru przy wyznaczaniu widma przebiegu rzeczywistego wynosił 0,3% (rozd. 6, str. 87) rozbieżności między wynikami obliczeniowymi i rzeczywistymi wynoszą ok. 17%.

Na rysunku 2.10a przedstawiono przebieg prądu zasilającego krajarkę zwojów MP-IV w Świeciu, sporządzony analitycznie.



Rys.2.10. Przebieg prądu i_w zasilającego tyrystorowy napęd krajarki zwojów MP-IV w Świeciu: a) przebieg analityczny, b) przebieg rzeczywisty

Przebieg ten nie jest wiernym odbiciem przebiegu rzeczywistego (rys. 2.10b), co głównie wynika z faktu iż jest on sumą jedynie harmonicznych 1, 5, 7 i 11 rzędu, a nie całego widma.

Powyższe uwagi upoważniają do stwierdzenia, że zaprezentowana metoda pozwala na dokładne wyznaczenie widma, a tym samym przebiegu prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy.

2.5. Podsumowanie

Wpływ pulsacji prądu wyprostowanego na widmo amplitudowo-częstotliwościowe prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik sześciopulsowy jest zagadnieniem złożonym. Mimo, że stanowi podstawowy problem w trakcie badania stopnia odkształcenia prądu pobieranego przez prostownik z sieci zasilającej nie był do tej pory szerzej analizowany. Przedstawiona metoda opracowana przez autora częściowo na bazie prac Uszakowa [51], Wasserraba [11] i Moltgena [4] pozwala na dokładne wyznaczenie zarówno widma, jak i kształtu przebiegu prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy. Jako założenia do obliczeń wymagane są znajomość parametrów obwodu zasilającego, tzn. napięcia zwarcia transformatora prostownikowego u_z , reakcji układu zasilającego X_K , wartości skutecznej napięcia zasilającego, parametrów obwodu obciążenia tej reakcji obwodu obciążenia X_d , wartości prądu wyprostowanego I_d oraz kąta sterowania α . Na podstawie powyższych założeń wyznacza się wartość stosunku X_d/X_K i zależnie od niego oraz od wartości kąta sterowania α wyznacza się dla danego napięcia zwarcia u_z wielkości względnej amplitudy k_n danej harmonicznej.

Wyniki uzyskane tą metodą niewiele odbiegają od wartości rzeczywistych. Różnica jest spowodowana głównie niesymetrią układów rzeczywistych. W metodzie tej pomija się wartości oporów czynnych obwodu obciążenia i zasilania, gdyż ich wpływ na kształt prądu pobieranego z sieci zasilającej jest nieznaczny [11,14,26]. Uzyskane wyniki są potwierdzeniem przydatności tej metody do wyznaczania widma prądu zasilającego prostowniki sześciopulsowe. Stanowią one również częściowe potwierdzenie tez pracy.

3. NIECHARAKTERYSTYCZNE HARMONICZNE PRĄDU W UKŁADACH ZASILANIA PROSTOWNIKÓW SZEŚCIOPULSOWYCH

3.1. Wstęp

W typowej analizie oddziaływania prostowników tyrystorowych na sieć zasilającą przyjmuje się, że w widmie prądu zasilającego prostownik sześciopulsowy występują jedynie harmoniczne określonych rzędów. Amplitudy oraz rzędy tych harmonicznych wyznacza się na podstawie analizy Fouriera, a harmoniczne te nazywa się harmonicznymi typowymi lub charakterystycznymi.

W układach rzeczywistych zaobserwowano jednak występowanie w widmie prądu zasilającego harmonicznych, których obecności nie można wyjaśnić na gruncie konwencjonalnej teorii prostowników. Harmoniczne te noszą nazwę nietypowych lub niecharakterystycznych. W trakcie pomiarów zaobserwowano, że pojawienie się harmonicznych niecharakterystycznych spowodowane jest nierównomiernością kątów zapłonu tyrystorów w mostku prostowniczym [16,42]. Jak dotąd zjawisko powstawania harmonicznych niecharakterystycznych i jego analiza sporadycznie pojawiała się w publikacjach dotyczących oddziaływania prostowników tyrystorowych na sieć zasilającą [3,4].

Istnieje literatura dotycząca wpływu niesymetrii obciążenia trzech faz układu zasilającego na skład i charakter widma prądu zasilającego prostownik [13,21,23]. Brak jest jednak publikacji dotyczących wpływu jakości i dokładności sterowania mostka tyrystorowego na widmo prądu pobieranego przez prostownik z sieci zasilającej. Brak jest również analizy wpływu zasilania układów sterowania prostowników napięciem odkształconym na wielkość i rodzaj harmonicznych generowanych przez prostowniki do sieci zasilającej. Jest to szczególnie istotne, gdyż układy sterowania prostowników zasilane są zwykle z tych samych transformatorów co ich obwody siłowe, czyli napięciem odkształconym.

W związku z tym, w dalszym ciągu będzie wyznaczona analityczna zależność między napięciem odkształconym zasilającym

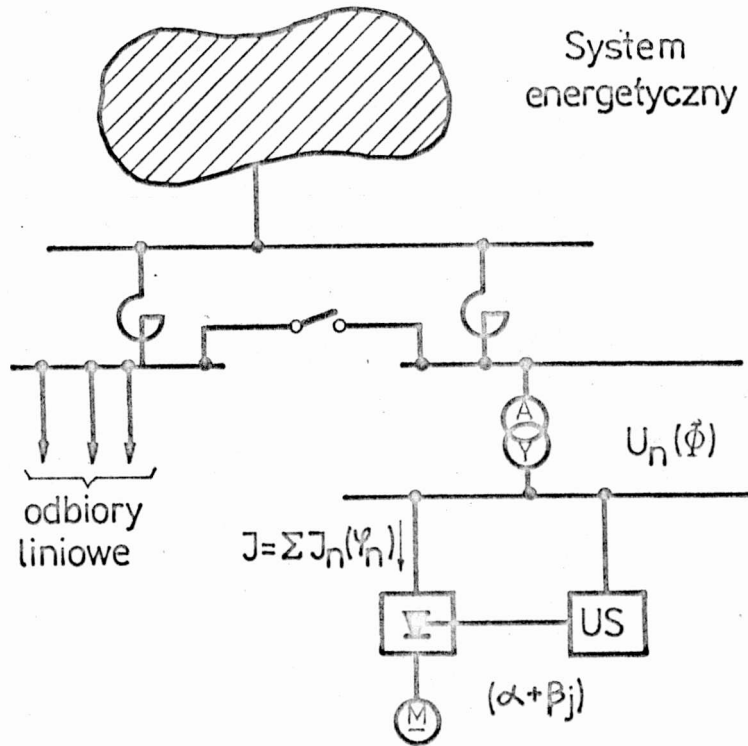
układ sterowania prostownika a obecnością harmonicznych niecharakterystycznych w prądzie zasilającym prostownik. W celu wyznaczenia tej zależności należy określić wpływ obecności harmonicznej rzędu n w napięciu zasilającym układ sterowania na błąd kąta zapłonu tyrystorów w mostku. Następnie zaś należy wyznaczyć harmoniczne niecharakterystyczne wytwarzane przez prostownik w prądzie zasilającym na skutek wcześniej wyznaczonego błędu kąta zapłonu.

3.2. Wyznaczenie błędów kąta zapłonu

Układy sterowania prostowników tyrystorowych są zwykle synchronizowane napięciem sieci zasilającej. Amplituda napięcia zasilającego jest porównywana z odpowiednią wartością napięcia stałego. Impuls bramkowy jest generowany wówczas, gdy wartość chwilowa napięcia przemiennego odpowiednio przetworzona jest równa co do wartości napięciu stałemu. Ponieważ wartość napięcia stałego nie jest istotna dla dalszej analizy założono, że jest ona równa zero. Impulsy bramkowe są więc wytwarzane, gdy spełniony jest następujący układ równań (rys. 2.5)

Zawór 1	$U_{RT} = 0$	
Zawór 3	$U_{SR} = 0$	
Zawór 5	$U_{TS} = 0$	
Zawór 2	$U_{TR} = 0$	(3.1)
Zawór 4	$U_{RS} = 0$	
Zawór 6	$U_{ST} = 0$	

Równania powyższe obowiązują przy zasilaniu układów sterowania napięciem sinusoidalnym. Jednak w typowych napędach prostownikowych średnich i dużych mocy układy sterowania zasilane są zwykle z tych samych transformatorów co ich obwody silnoprządowe (rys. 3.1) czyli napięciem odkształconym. Zakładając, że napięcie zasilające układ sterowania zawiera harmoniczną rzędu n o względnej wartości amplitudy U_n , równania (3.1) przyjmą postać



Rys.3.1. Schemat ideowy zasilania prostownika sześciopulso-
wego wraz z zasilaniem układu sterowania U.S. gdzie: US -
- układ sterowania prostownika, M - silnik obcowzbudny
prądu stałego

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{3} \sin x + \sqrt{3} U_n \sin n(x + \varphi) = 0 \\
 & \sqrt{3} \sin \left(x - \frac{2\pi}{3} \right) + \sqrt{3} U_n \sin \left[n(x + \varphi) \mp \frac{2\pi}{3} \right] = 0 \\
 & \sqrt{3} \sin \left(x - \frac{4\pi}{3} \right) + \sqrt{3} U_n \sin \left[n(x + \varphi) \mp \frac{4\pi}{3} \right] = 0 \\
 & \sqrt{3} \sin (x + \pi) + \sqrt{3} U_n \sin [n(x + \varphi) + \pi] = 0 \\
 & \sqrt{3} \sin \left(x + \pi - \frac{2\pi}{3} \right) + \sqrt{3} U_n \sin \left[n(x + \varphi) + \pi \mp \frac{2\pi}{3} \right] = 0 \\
 & \sqrt{3} \sin \left(x + \pi - \frac{4\pi}{3} \right) + \sqrt{3} U_n \sin \left[n(x + \varphi) + \pi \mp \frac{4\pi}{3} \right] = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

gdzie znak " $\mp$ " w drugim wyrazie dotyczy dodatniej lub ujemnej fazy harmoniczej.

Jeżeli błąd kąta zapłonu β_i będzie odchyłką od wielkości obliczonych przy pomocy układu równań (3.2) dla $U_n=0$, to równania te można zapisać w następującej postaci

$$\begin{aligned}
 \text{Zawór 1} \quad & \sin \beta_1 + U_n \sin n(\beta_1 + \varphi) = 0 \\
 \text{Zawór 3} \quad & \sin \beta_3 + U_n \sin \left[n(\beta_3 + \varphi + \frac{2\pi}{3}) \mp \frac{2\pi}{3} \right] = 0 \\
 \text{Zawór 5} \quad & \sin \beta_5 + U_n \sin \left[n(\beta_5 + \varphi + \frac{4\pi}{3}) \mp \frac{4\pi}{3} \right] = 0 \\
 \text{Zawór 2} \quad & \sin \beta_2 + U_n \sin \left[n(\beta_2 + \varphi - \pi) + \pi \right] = 0 \\
 \text{Zawór 4} \quad & \sin \beta_4 + U_n \sin \left[n(\beta_4 + \varphi - \frac{\pi}{3}) + \pi \mp \frac{2\pi}{3} \right] = 0 \\
 \text{Zawór 6} \quad & \sin \beta_6 + U_n \sin \left[n(\beta_6 + \varphi + \frac{\pi}{3}) + \pi \mp \frac{4\pi}{3} \right] = 0
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Po przekształceniach równania powyższe można podzielić na sześć grup [46], co przedstawiono w tabeli 3.1. Harmoniczne oraz równania określające błędy kątów zapłonu im odpowiadających dzielą się na grupy wg schematu pokazanego na rysunku 3.2.

A(1)	A(2)
+1	-2
-5	+4
+7	-8
-11	+10
+13	-14
-17	+16
+19	-20
-23	+22
+25	

B(1)	B(2)
-1	-4
+3	+6
-7	-10
+9	+12
-13	-16
+15	+18
-19	-22
+21	+24
-25	

C(1)	C(2)
-3	+2
+5	-6
-9	+8
+11	-12
-15	+14
+17	-18
-21	+20
+23	-24

Rys.3.2. Grupy harmoniczych dla równań z tabeli 3.1

Należy zauważyć, że błędy kąta zapłonu wyznaczone na podstawie równań grupy A(1) są identyczne dla wszystkich tyrystorów mostka. Innymi słowy, błędy tej grupy zmieniają kąty zapłonu o tę samą wartość. Można je więc pominąć w trakcie dalszej analizy.

Harmoniczne grupy A(2) wprowadzają identyczne błędy kątów zapłonu zaworów 1, 3, 5 (rys. 2.5) i inny ciąg identycznych

T a b e l a 3.1.

Grupy równań określających błędy kąta zapłonu

Rząd i znak harmonicznych	Numer zaworu mostka i	Równanie określających błędy kąta zapłonu	Grupa błędów
+1,-5,+7,-11	1-6	$\sin \beta_i + U_n \sin n(\beta_i + \varphi) = 0$	A(1)
-2,+4,-8,+10	1-6	$\sin \beta_i (-)^{i+1} U_n \sin n(\beta_i + \varphi) = 0$	A(2)
-1,+3,-7,+9,-13	1-2	$\sin \beta_i + U_n \sin n(\beta_i + \varphi) = 0$	B(1)
	3-4	$\sin \beta_i + U_n \sin \left[n(\beta_i + \varphi) - \frac{2\pi}{3} \right] = 0$	
	5-6	$\sin \beta_i + U_n \sin \left[n(\beta_i + \varphi) - \frac{4\pi}{3} \right] = 0$	
-4,+6,-10,+12	1-2	$\sin \beta_i (-)^{i+1} U_n \sin n(\beta_i + \varphi) = 0$	B(2)
	3-4	$\sin \beta_i (-)^{i+1} U_n \sin \left[n(\beta_i + \varphi) - \frac{2\pi}{3} \right] = 0$	
	5-6	$\sin \beta_i (-)^{i+1} U_n \sin \left[n(\beta_i + \varphi) - \frac{4\pi}{3} \right] = 0$	
-3,+5,-9,+11	1-2	$\sin \beta_i + U_n \sin n(\beta_i + \varphi) = 0$	C(1)
	3-4	$\sin \beta_i + U_n \sin \left[n(\beta_i + \varphi) - \frac{4\pi}{3} \right] = 0$	
	5-6	$\sin \beta_i + U_n \sin \left[n(\beta_i +) - \frac{2\pi}{3} \right] = 0$	
+2,-6,+8,-12	1-2	$\sin \beta_i (-)^{i+1} U_n \sin n(\beta_i + \varphi) = 0$	C(2)
	3-4	$\sin \beta_i (-)^{i+1} U_n \sin \left[n(\beta_i + \varphi) - \frac{4\pi}{3} \right] = 0$	
	5-6	$\sin \beta_i (-)^{i+1} U_n \sin \left[n(\beta_i + \varphi) - \frac{2\pi}{3} \right] = 0$	

błędów dla zaworów 2, 4, 6 (rys. 2.5). Przyjmując, że kąt zapłonu mostka jest zdefiniowany jako średni ze wszystkich kątów jednego zestawu tyrystorów (np. 1, 3, 5 na rys. 2.5), wówczas kąty zapłonu zestawu 1, 3, 5 są przyspieszane, a kąty zapłonu zestawu (2, 4, 6 na rys. 2.5) są opóźniane.

Z tabeli 3.1 wynika również, że grupy z indeksami 1 zawierają harmoniczne nieparzyste, natomiast grupy z indeksami 2 - harmoniczne parzyste. Dla wszystkich harmonicznych nieparzystych błędy kątów zapłonu dla dwóch tyrystorów połączonych do tej samej fazy są równe. Biorąc pod uwagę powyższe uwagi oraz fakt, że grupy B i C są podobne można ograniczyć rozważania do trzech zestawów równań

- grupy A(2), B(1) i B(2)
- grupy A(2), C(1) i C(2).

Zatem znając wartości amplitudy oraz kąta fazowego harmonicznej rzędu n w napięciu zasilającym układ sterowania można na podstawie równań należących do jednej z wyżej podanych grup wyliczyć błąd kąta zapłonu poszczególnych tyrystorów w mostku prostowniczym. Następnie należy wyznaczyć amplitudy harmonicznych nietypowych jakie występują w widmie prądu zasilającego prostownik na skutek błędów kąta zapłonu. Jest to przedmiotem następnego paragrafu, punktu 3.3.

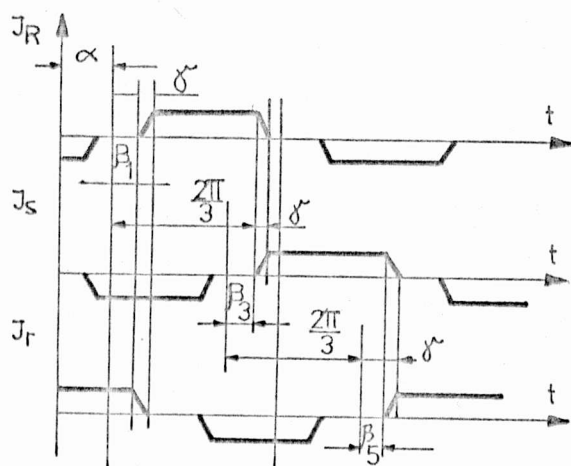
3.3. Wyznaczenie nietypowych harmonicznych w prądzie zasilającym prostownik sześciopulsowy

Jak wiadomo błędy kąta zapłonu powodują nierównomierne obciążenie trzech faz układu zasilającego prostownik. Jest to powodem występowania w widmie prądu zasilającego harmonicznych niecharakterystycznych. Inaczej mówiąc, szereg Fouriera prądów zasilających zawiera harmoniczne charakterystyczne i niecharakterystyczne. Można więc zapisać

$$I_{R,S,T} = \sum_{n=1}^{\infty} I_{R,S,T(n)} [\varphi_{R,S,T(n)}] \quad (3.4)$$

Ponieważ wszystkie błędy kąta β_i mogą się różnić między sobą koniecznym wydaje się rozwinięcie w szereg Fouriera zależności określającej prąd zasilający prostownik dla dowolnego ciągu β_i .

Na rysunku 3.3 przedstawiono przykładowo przebiegi prądów



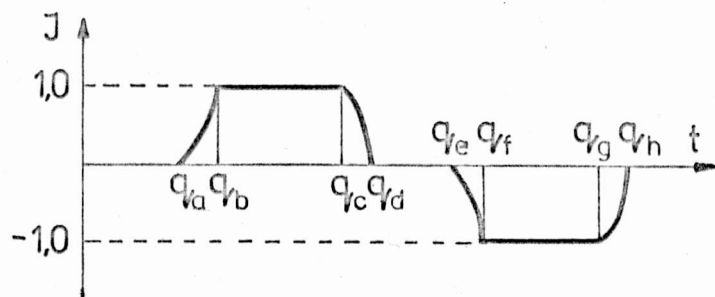
Rys.3.3. Przebiegi trójfazowych prądów I_R, I_S, I_T zasilających prostownik dla dowolnych wartości błędów kąta zapłonu

zasilających prostownik w poszczególnych fazach dla dowolnie przyjętych błędów kąta zapłonu. Jak wynika z rysunku 3.3 kąt zapłonu każdego tyrystora wynosi $\alpha + \beta_i$. W związku z tym równanie określające kąt komutacji prostownika sześciopulsowego ma postać

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \beta_1) - \cos(\alpha + \beta_1 + \gamma) &= \\ &= \frac{I_d X_K}{U_m \sin \frac{\pi}{6}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Jak wynika z wzoru (3.5) zniekształcenie prądu zasilającego wywołane przez β_i może być znaczne.

Przykładowo rozważono przebieg prądu I pokazany na rysunku 3.4. Przebieg prądu między kątami q_b i q_c oraz q_f i q_g



jest stały i wynosi +1 lub -1 w jednostkach względnych. W zakresie kątów q_a i q_b przebieg prądu otrzymuje się przez rozwiązanie równania komutacyjnego (3.5) i można go wyrazić następująco

Rys.3.4. Przebieg prądu I dla dowolnej wartości błędu kąta sterowania β_i

$$I(q_a \leq q \leq q_b) = \frac{\cos \alpha - \cos (\alpha + q - q_a)}{\cos \alpha - \cos (\alpha - \gamma)} \quad (3.6)$$

natomiast przebieg prądu między q_c i q_d określa równanie

$$I(q_c \leq q \leq q_d) = 1 - \frac{\cos \alpha - \cos (\alpha + q - q_c)}{\cos \alpha - \cos (\alpha - \gamma)} \quad (3.7)$$

Rozwinięcie w szereg Fouriera przebiegu prądu I z rysunku 3.4, określonego równaniami (3.6) i (3.7), można zapisać następująco

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} I_j(n) \cos nq + \sum_{n=1}^{\infty} I_r(n) \sin nq \quad (3.8)$$

gdzie wielkości $I_r(n)$ i $I_j(n)$ są składową rzeczywistą i urojoną n -tej harmonicznej wartości prądu I_n , przy czym

$$I_j(n) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I \cos nq \, dq$$

$$I_r(n) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I \sin nq \, dq \quad (3.9)$$

Rozwiązanie powyższych równań jest pracochłonne i skomplikowane. Można je uprościć stosując następujące podstawienie [46]

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{1}{n} \left[\sin nq_c + \sin nq_f - \sin nq_b - \sin nq_g \right] \\
 p_2 &= \frac{1}{n} \left[\frac{\sin nq_h - \sin nq_a - \sin nq_f + \sin nq_e}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} + (1 + \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\cos \alpha + \cos(\alpha - \gamma)}) (\sin nq_d - \sin nq_c - \sin nq_h + \right. \\
 &\quad \left. + \sin nq_g) \right] \\
 p_3 &= \frac{1}{n} \left[\cos nq_b + \cos nq_g - \cos nq_c - \cos nq_f \right] \\
 p_4 &= \frac{1}{n} \left[\frac{-\cos nq_b + \cos nq_a + \cos nq_f - \cos nq_e}{\cos \alpha + \cos(\alpha - \gamma)} + (1 + \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\cos \alpha + \cos(\alpha - \gamma)}) (-\cos nq_d + \cos nq_c + \cos nq_h + \right. \\
 &\quad \left. - \cos nq_g) \right].
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

W efekcie składowa rzeczywista i urojona harmonicznej podstawowej wyraża się następującymi zależnościami

$$\begin{aligned}
 I_j(1) &= \frac{1}{\pi} \left\{ p_1 + p_2 + \frac{\frac{1}{2} \gamma}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \left[-\cos(\alpha - q_a) + \cos(\alpha - q_e) + \right. \right. \\
 &\quad \left. + \cos(\alpha - q_c) - \cos(\alpha - q_g) \right] + \frac{1}{4 [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]} \left[-(\sin 2q_b + \right. \\
 &\quad - \sin 2q_a) \cos(\alpha - q_a) + (\cos 2q_b - \cos 2q_a) \sin(\alpha - q_a) + \\
 &\quad + (\sin 2q_f - \sin 2q_e) \cos(\alpha - q_e) + (\cos 2q_f - \cos 2q_e) \sin(\alpha - q_e) + \\
 &\quad + (\sin 2q_d - \sin 2q_c) \cos(\alpha - q_c) + (\cos 2q_d - \cos 2q_c) \sin(\alpha - q_c) + \\
 &\quad \left. - (\sin 2q_h - \sin 2q_g) \cos(\alpha - q_g) + (\cos 2q_h - \cos 2q_g) \sin(\alpha - q_g) \right] \Big\} \\
 &\tag{3.11}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{r(1)} = \frac{1}{\pi} \left\{ p_3 + p_4 + \frac{\frac{1}{2} \gamma}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \left[\sin(\alpha - q_a) - \sin(\alpha - q_e) + \right. \right. \\
 \left. \left. - \sin(\alpha - q_c) + \sin(\alpha - q_g) \right] + \frac{1}{4 [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]} \left[-(\sin 2q_b + \right. \right. \\
 \left. \left. - \sin 2q_a) \sin(\alpha - q_a) + (\cos 2q_b - \cos 2q_a) \cos(\alpha - q_a) + (\sin 2q_f + \right. \right. \\
 \left. \left. - \sin 2q_e) \sin(\alpha - q_e) - (\cos 2q_f - \cos 2q_e) \cos(\alpha - q_e) + (\sin 2q_d + \right. \right. \\
 \left. \left. - \sin 2q_c) \sin(\alpha - q_c) - (\cos 2q_d - \cos 2q_c) \cos(\alpha - q_c) - (\sin 2q_h + \right. \right. \\
 \left. \left. - \sin 2q_g) \sin(\alpha - q_g) + (\cos 2q_h - \cos 2q_g) \cos(\alpha - q_g) \right] \right\} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

Zaś harmoniczne wyższych rzędów przedstawiają zależności

$$\begin{aligned}
 I_{j(n)} = \frac{1}{\pi} \left\{ p_1 + p_2 + \frac{n}{n^2 - 1} \left[\cos(\alpha + \gamma) (-\sin nq_b + \sin nq_f + \sin nq_d + \right. \right. \\
 \left. \left. - \sin nq_h) + \sin(\alpha + \gamma) (\cos nq_b - \cos nq_f - \cos nq_d + \sin nq_h) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \cos \alpha (\sin nq_a - \sin nq_e - \sin nq_c + \sin nq_g) + \sin \alpha (-\cos nq_a + \right. \right. \\
 \left. \left. + \cos nq_e + \cos nq_c - \cos nq_g) \right] \frac{1}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \right\}. \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{r(n)} = \frac{1}{\pi} \left\{ p_2 + p_3 + \frac{n}{n^2 - 1} \left[(\cos nq_b - \cos nq_f - \cos nq_d + \cos nq_h) \cdot \right. \right. \\
 \left. \left. \cdot \cos(\alpha + \gamma) + \sin(\alpha + \gamma) (-\sin nq_b - \sin nq_f - \sin nq_d + \sin nq_h) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \cos \alpha (-\cos nq_a + \cos nq_e + \cos nq_c - \cos nq_g) + \sin \alpha (\sin nq_a + \right. \right. \\
 \left. \left. + \sin nq_e + \sin nq_c - \sin nq_g) \right] \frac{1}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \right\} \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

Zależności powyższe dotyczą przypadku, gdy zarówno kąty komutacji γ , jak i sterowania α są stałe dla wszystkich zaworów mostka. Dla różnych kątów komutacji i sterowania poszczególnych zaworów wyrażenia te komplikują się zasadniczo. W efekcie przeprowadzonych rozważań można wyznaczyć zależność między błędem kąta β zapłonu mostka a pozostałymi niecharakterystycznymi harmonicznymi prądu. W tym celu wybrano przykładowo trzy zestawy błędów (I), (II) i (III), zakładając jednocześnie, że odpowiadają one grupom A(2), B(1) i B(2) oraz A(2), C(1) i C(2).

Przyjęte w ten sposób zestawy błędów przedstawiono w tabeli 3.2.

T a b e l a 3.2.

Zestawy błędów kąta zapłonu

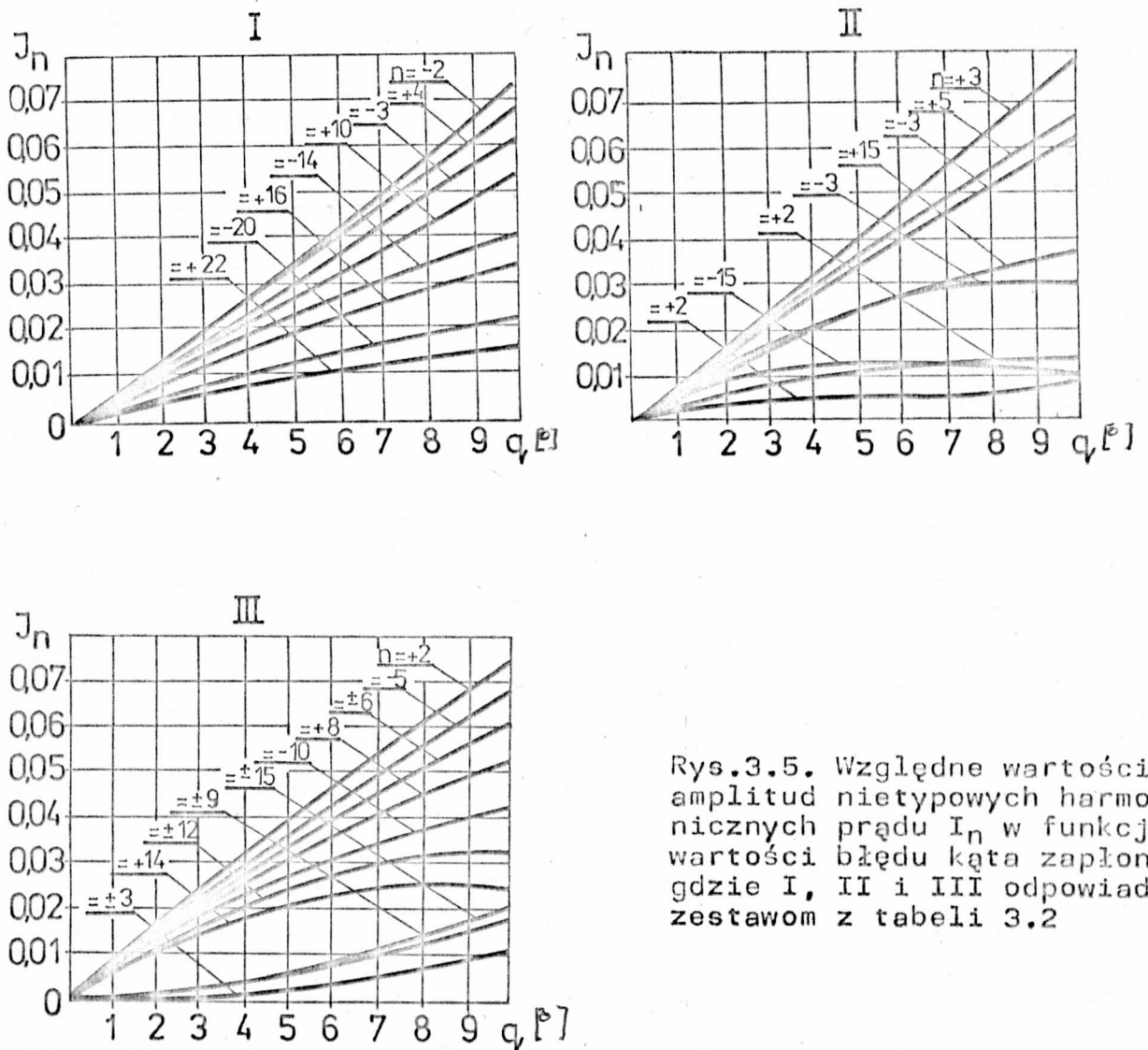
Błąd kąta zapłonu	I [°]	II [°]	III [°]
β_1	0	0	0
β_2	q	0	0
β_3	0	q	q
β_4	q	q	-q
β_5	0	-q	-q
β_6	q	-q	q

Na podstawie danych z tabeli 3.1 oraz w oparciu o wzory (3.13) i (3.14), na rysunku 3.5 przedstawiono względne wartości amplitud I_n niecharakterystycznych harmoniczných prądu dla różnych wartości błędu kąta zapłonu β .

W zestawie pierwszym (I) (tab. 3.2) zawory oznaczone na rys. 2.5 numerami 1, 3, 5 są sterowane idealnie, tzn. błąd kąta zapłonu wynosi zero, natomiast zawory oznaczone numerami 2, 4, 6 posiadają równe błędy kąta zapłonu. Jak widać nie występują w tym wypadku harmoniczne trzecia i jej wielokrotności, natomiast zaznacza się wyraźna obecność harmoniczných parzystych. Ich amplitudy wzrastają praktycznie liniowo ze wzrostem kąta błędu oraz maleją ze wzrostem rzędu harmoniczných.

W zestawie drugim (II) (tab. 3.2) tyrystory przyłączone do tych samych faz mają równe błędy kąta zapłonu. Spowodowało to pojawienie się harmoniczných trzeciej oraz jej wielokrotności o znacznych amplitudach. W sposób istotny zmalały amplitudy harmoniczných parzystych. Amplituda harmoniczných +2 posiada praktycznie stałą wartość dla wszystkich wartości kąta błędu q.

W zestawie trzecim (III) zawory przyłączone do fazy R są sterowane idealnie, natomiast zawory przyłączone do fazy S i T posiadają równe błędy kąta zapłonu z tym, że np. kąt stero-



Rys.3.5. Względne wartości amplitud nietypowych harmoniczných prądu I_n w funkcji wartości błędu kąta zapłonu gdzie I, II i III odpowiada zestawom z tabeli 3.2

wania jednego zaworu fazy S jest przyspieszany, a drugiego opóźniany o tę samą wartość. Widmo prądu zasilającego zawiera w tym wypadku harmoniczne parzyste o znacznych amplitudach. W widmie pojawiają się także harmoniczna trzecia i jej wielokrotności, lecz o znikomych amplitudach.

Podana przez autora metoda pozwala wyznaczyć harmoniczne niecharakterystyczne, będące skutkiem nierównomierności kątów sterowania zaworów mostka. Inaczej mówiąc określa ona zależność między zasilaniem układu sterowania napięciem odkształconym a niecharakterystycznymi harmonicznymi prądu pobieranymi z sieci zasilającej przez prostownik. Nie uwzględnia ona jednak niesymetrii układu zasilającego. Stosując ją należy

się więc liczyć z faktem, iż wraz ze wzrostem niesymetrii układu zasilającego uzyskane wyniki mogą odbiegać od wartości rzeczywistych.

3.4. Weryfikacja pomiarowa metody wyznaczania nietypowych harmoniczných prądu zasilającego prostownik zależnie od wielkości błędu kąta zapłonu

W celu weryfikacji pomiarowej zaproponowanej metody skorzystano z wyników badań przeprowadzonych w Zakładach Celulozy i Papieru w Świeciu i Szczecińskich Zakładach Papierniczych w Skolwinie szczegółowo opisanych w rozdz. 7.

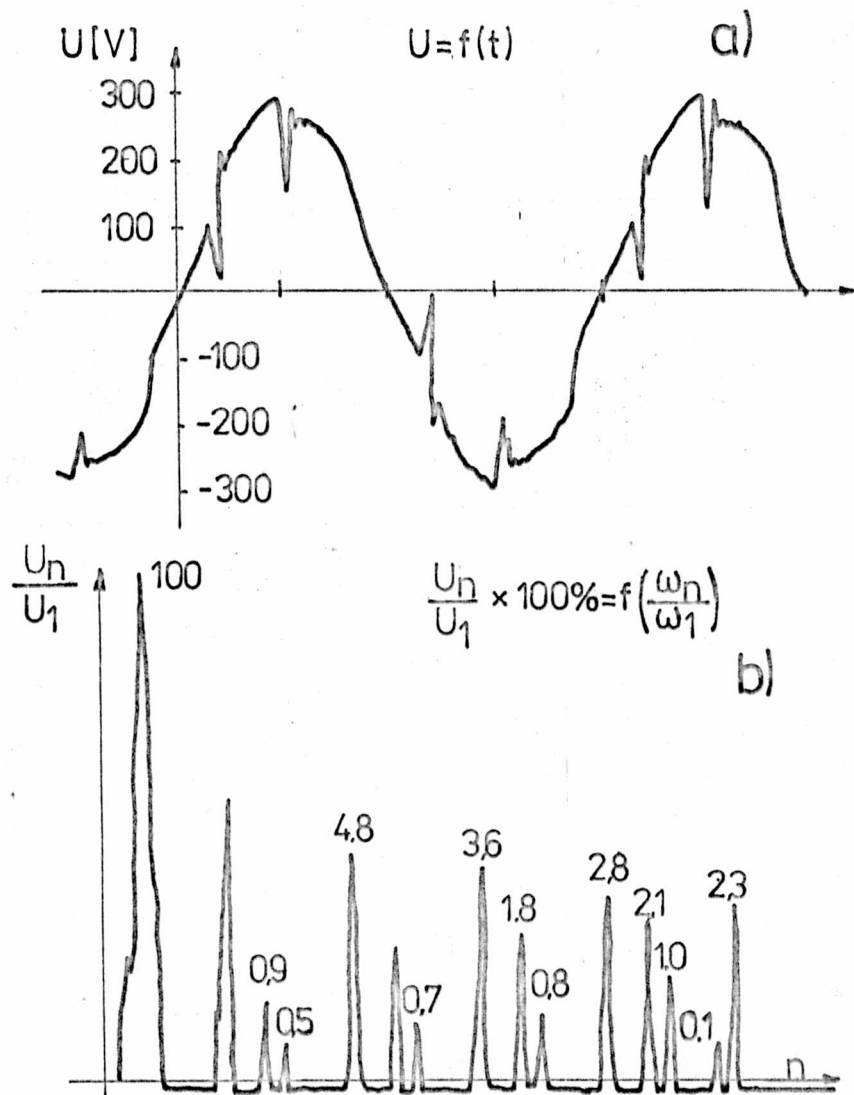
Na rysunku 3.6 przedstawiono przebieg oraz widmo napięcia zasilającego układ sterowania prostownikowego napędu sita MPV w Świeciu. Na tej podstawie przyjęto, że układ sterowania zasilany jest napięciem odkształconym o dominującej piątej harmonicznej, której względna amplituda wynosi 9,5%. Stanowi to podstawę dalszych obliczeń. Na podstawie wyżej przyjętego założenia oraz w oparciu o tabelę 3.1 wyznaczono grupę błędów oraz błąd kąta zapłonu β odpowiadające piątej harmonicznej napięcia zasilającego. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.3.

T a b e l a 3.3.

Błędy kąta zapłonu β napędu sita MP-V w Świeciu dla amplitudy piątej harmonicznej napięcia zasilającego równej 9,5%

Grupa C(1)					
β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
0	0	$7,91^\circ$	$-7,91^\circ$	$8,45^\circ$	$-8,45^\circ$

Jak wynika z porównania wartości w tabelach 3.2 i 3.3 wyniki uzyskane na podstawie pomiarów odpowiadają grupie III w tabeli 3.2. Można więc przy analizie skorzystać z rysunku 3.5 III. Na jego podstawie określono wartości amplitud spodziewanych niecharakterystycznych harmoniczných prądu i porównano je w tabeli 3.4 z wartościami zmierzonymi.



Rys.3.6. Przebieg czasowy napięcia fazowego $u_{\phi 0}$ zasilającego układ sterowania napędu sita MP-V w Świeciu a) oraz jego widmo amplitudowo-częstotliwościowe b)

Różnice między wartościami zmierzonymi i wyliczonymi są znaczne i dochodzą np. dla 4 harmonicznej do 50%. Spowodowane są one dużą niesymetrią fazową układu zasilającego (rozdz. 7.2.2) oraz faktem, że w napięciu zasilającym występują oprócz piątej harmonicznej również harmoniczne innych rzędów (rys. 3.6), których wpływu nie uwzględniono. Autor uważa jednak, że mimo tak dużych błędów, metoda daje wystarczającą dokładność w zastosowaniach praktycznych.

T a b e l a 3.4.

Obliczone i zmierzone wartości amplitud niecharakterystycznych harmonicznych prądu zasilającego napęd sita MP-V w Świeciu

Rząd harmonicznej n	2	3	4	6	8	9	10
Wartość amplitudy zmierzona I [%]	6,3	0,9	3,6	4,1	3,2	0,9	2,2
Wartość amplitudy obliczona I [%]	6,0	0,6	5,5	5,0	4,5	1,2	3,7

3.5. Podsumowanie

Przedstawiono metodę określającą wpływ zasilania układu sterowania prostownika napięciem odkształconym na widmo prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik. Określono błędy kąta zapłonu tyrystorów w mostku prostowniczym zależnie od rzędu i amplitudy harmonicznej zawartej w napięciu zasilającym układ sterowania. Następnie podano zależności między błędami kąta zapłonu tyrystorów, a niecharakterystycznymi harmonicznymi prądu pobieranego przez prostownik z sieci zasilającej. Wyniki uzyskane na drodze teoretycznej porównano z wynikami pomiarów. Należy podkreślić, że zastosowana metoda wymaga szeregu założeń upraszczających, tzn. zakłada stałość prądu w obwodzie obciążenia oraz nie uwzględnia niesymetrii fazowej układu zasilającego. Czynniki te są powodem różnic między wynikami analizy i wynikami pomiarów.

Zagadnienia wyznaczania harmonicznych niecharakterystycznych w układach zasilania prostowników sześciopulsowych ma duże znaczenie praktyczne tam, gdzie układy sterowania prostowników zasilane są z tych samych transformatorów co ich obwody siłowe. Taki system zasilania jest stosowany w napędach elektrycznych maszyn papierniczych. Ze względu na wymaganą dużą dynamikę napędu maszyny papierniczej problemy dokładności sterowania grają pierwszoplanową rolę. Zasilanie układów sterowania napięciem odkształconym jest więc problemem, ze wszech miar ważnym.

Przedstawiona przez autora metoda stanowi pewne uogólnienie metod opracowanych przez A.G. Phandke [46] i N.N. Charlo-
wa [21]. Uogólnienie polega na przyjęciu prądu pobieranego
z sieci zasilającej.

4. ODDZIAŁYWANIE KILKU PROSTOWNIKÓW NA SIEĆ ZASILAJĄCĄ, W PUNKCIE ICH WSPÓLNEGO PRZYŁĄCZENIA

4.1. Wstęp

Analiza oddziaływania napędów prostownikowych na sieć zasilającą ogranicza się zazwyczaj do badania jednego prostownika zasilającego jeden lub kilka silników obcowzbudnych prądu stałego. Jednak w praktyce najczęściej z jednego transformatora zasilanych jest kilka prostowników. Przykładem może tu być napęd maszyny papierniczej lub walcowni.

Celowym wydaje się zatem opracowanie metod badania wpływu grup prostowników zasilanych z tego samego transformatora na sieć zasilającą. Zagadnienie to jest często pomijane w trakcie analizy [2,16,19].

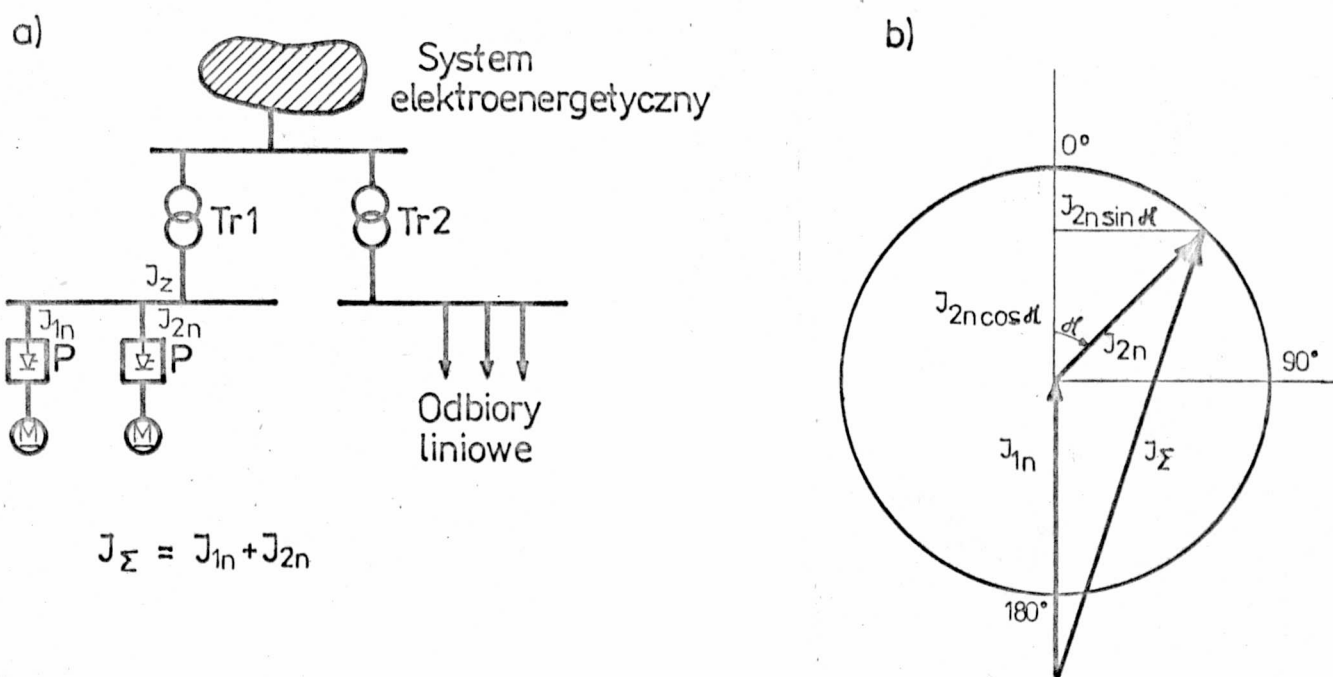
W ostatnim okresie pojawiły się prace dotyczące problemów sumowania harmonicznych prądu pochodzących od kilku prostowników zasilanych z tego samego transformatora [25,36,55]. Niektóre z nich dotyczą symulacji cyfrowej [49], inne badań statystycznych [33] wypadkowej harmonicznej kilku prostowników. Powszechnie przyjmuje się jednak w dalszym ciągu zgodnie z zasadą "najgorszego przypadku", że wypadkowy prąd harmonicznej danego rzędu jest równy sumie arytmetycznej harmonicznych składowych.

Jak wynika z powyższych rozważań, posiadanie metod analitycznych lub pomiarowych do badania sumarycznego oddziaływania na sieć zasilającą staje się nieodzownym elementem przy badaniu warunków pracy napędu elektrycznego z kilkoma prostownikami.

4.2. Harmoniczne prądu pobierane z sieci zasilającej przez grupowe napędy prostownikowe

4.2.1. Harmoniczne prądu pobierane z sieci zasilającej przez dwa prostowniki zasilane z jednego transformatora

Prąd wypadkowy harmonicznego rzędu n kilku prostowników tyrystorowych zasilanych z tego samego transformatora jest sumą wektorową prądów harmoniczných pochodzących od poszczególnych prostowników. Na rysunku 4.1 przedstawiono wykres wskazowy prądów harmoniczných tego samego rzędu pochodzących od dwóch prostowników.



Rys.4.1. Układ zasilania dwóch prostowników (a) oraz wykres wskazowy wypadkowej harmonicznego (b), gdzie: Tr1, Tr2 - transformatory zasilające, M - silniki obcowzbudne prądu stałego, P - prostowniki

Układ taki odpowiada zasilaniu dwóch najbardziej obciążonych sekcji maszyny papierniczej, tj. sekcji sitowej i sekcji pras.

Na podstawie rysunku 4.1 dla wypadkowego prądu dwóch prostowników $I_{n\Sigma}$ można napisać

$$\begin{aligned} I_{n\Sigma} &= \sqrt{(I_{1n} + I_{2n} \cos \alpha)^2 + (I_{2n} \sin \alpha)^2} = \\ &= \sqrt{I_{1n}^2 + I_{2n}^2 + 2I_{1n} I_{2n} \cos \alpha} \end{aligned} \quad (4.1)$$

W celu uzyskania wartości skutecznej prądu wypadkowego przy zmianie kąta α od 0° do 180° należy wyrażenie (4.1) scałkować w przedziale od $\alpha=0^\circ$ do $\alpha=180^\circ$

$$\hat{I}_\Sigma = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha=0^\circ}^{180^\circ} \sqrt{I_{1n}^2 + I_{2n}^2 + 2I_{1n} I_{2n} \cos \alpha} d\alpha \quad (4.2)$$

Wyrażenie powyższe można przekształcić do postaci

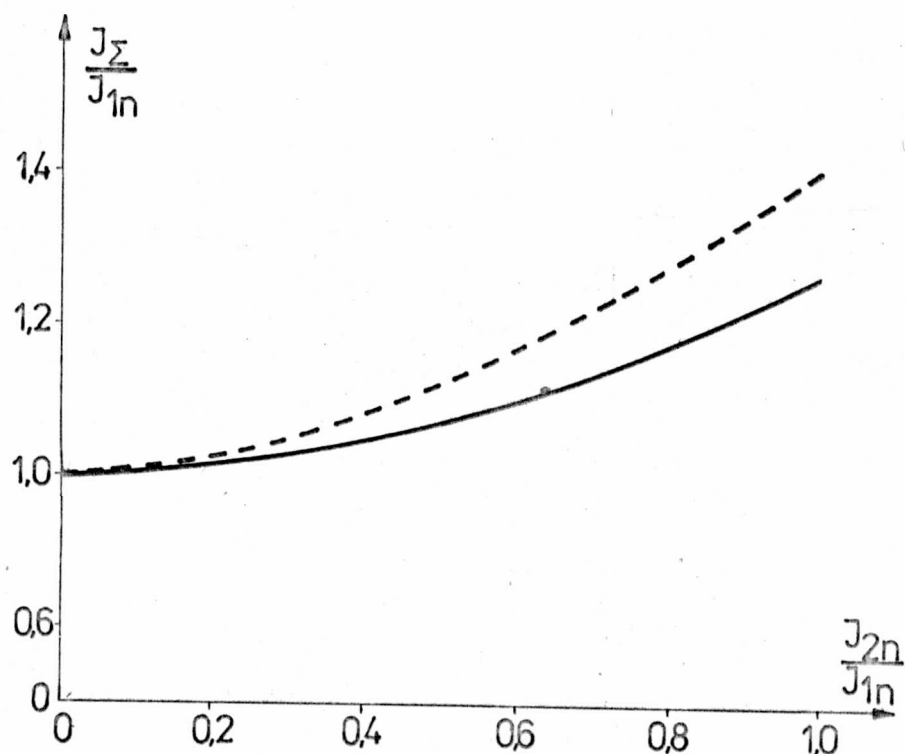
$$\hat{I}_\Sigma = \frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{I_{2n}}{I_{1n}}\right) I_{1n} \int_{\frac{1}{2}\alpha=0^\circ}^{90^\circ} \sqrt{1 - \left(\frac{2\sqrt{\frac{I_{2n}}{I_{1n}}}}{1 - \frac{I_{2n}}{I_{1n}}} \sin \frac{1}{2}\alpha \right)^2} d\frac{1}{2}\alpha \quad (4.3)$$

Równanie powyższe jest całką eliptyczną zupełną, której moduł wynosi

$$k = \frac{2\sqrt{\frac{I_{2n}}{I_{1n}}}}{1 - \frac{I_{2n}}{I_{1n}}} \quad (4.4)$$

Zależność wartości skutecznej wypadkowego prądu harmonicznego rzędu n od prądów harmoniczných dwóch przekształtników, określoną równaniem (4.3) przedstawiono na rysunku 4.2. Na jego podstawie można stwierdzić, że dla dwóch jednakowo obciążonych prostowników wartość wypadkowego prądu harmonicznego rzędu n stanowi ok. 1,3 prądu harmonicznego jednego prostownika, co odpowiada 65% sumy arytmetycznej dwóch prostowników. Na rysunku 4.2 przedstawiono również przebieg wartości średniej wypadkowego prądu harmonicznego rzędu n dwóch prostowników w funkcji ich obciążenia [32].

Jak wynika z dotychczasowych rozważań wartość skuteczna wypadkowego prądu dwóch prostowników jest funkcją uwikłaną.



Rys.4.2. Przebieg wypadkowego prądu harmonicznego dowolnego rzędu dwóch prostowników w funkcji harmoniczných prądów składowych: ----- przebieg wartości średniej, ——— przebieg wartości skutecznej

Jeżeli uwzględnić jeszcze przypadkowe zmiany obciążenia prostowników, a tym samym przypadkowe zmiany kątów sterowania prostowników oraz ich większą liczbę, rozwiązanie powyższego zagadnienia staje się skomplikowane i pracochłonne. W związku z tym [2,47] przyjmuje się, że wypadkowy prąd harmoniczny kilku prostowników jest równy sumie arytmetycznej harmoniczných prądów składowych. Licząc sumę arytmetyczną harmoniczných tego samego rzędu wszystkich prostowników zasilanych z jednego transformatora, jako obciążenie znamionowe prostowników przyjmuje się obciążenie impulsowe lub inne obciążenie robocze. Rezultat tych obliczeń może znacznie odbiegać od rzeczywistego poziomu harmoniczných prądu w sieci zasilającej (rys. 4.2). Ponadto, im większa jest ilość prostowników w napędzie grupowym tym mniejsze jest prawdopodobieństwo, że harmoniczne prądu poszczególných prostowników zsumują się arytmetycznie.

Metoda arytmetycznego sumowania może prowadzić zatem do nadmiernego oszacowania wypadkowego prądu harmonicznego w sieci zasilającej, a tym samym do nieuzasadnionego zwiększenia nakładów na ewentualne układy przeciwzakłóceń.

Zatem, aby otrzymać wiarygodne oszacowanie wypadkowego prądu harmonicznego celowym wydaje się zastosowanie metod statystyki matematycznej oraz rachunku prawdopodobieństwa.

4.2.2. Statystyczne metody określania wyższych harmonicznego prądu pobieranych z sieci zasilającej przez grupowe napędy tyrystorowe

W 1975 r. A. Kloss [33] zaproponował, aby harmoniczne prądu wprowadzane do sieci zasilającej traktować jako dwuwymiarowe wektory losowe. Przy takim założeniu każda harmoniczna prądu jest wektorem określonym przez swoją amplitudę I_{xn} oraz kąt fazowy φ_{xn} . Amplituda I_{xn} i kąt fazowy φ_{xn} są zmiennymi losowymi o rozkładzie prawdopodobieństwa p zależnym od warunków pracy prostownika. Mogą one zmieniać się od wartości minimalnej do maksymalnej w sposób następujący

$$\begin{aligned} I_{xnmin} &\leq I_{xn} \leq I_{xnmax} & x=1,2,3,\dots,N \\ \varphi_{xnmin} &\leq \varphi_{xn} \leq \varphi_{xnmax} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{gdzie } N - \text{liczba} \\ \text{prostowników w} \\ \text{napędzie} \end{array} \quad (4.5)$$

W każdej chwili czasowej wektory harmoniczne tworzą sumę geometryczną

$$\hat{I}_{n\Sigma} = \hat{I}_{1n} + \hat{I}_{2n} + \hat{I}_{3n} + \dots + \hat{I}_{Nn} \quad (4.6)$$

Wektor prądu sumarycznego $\hat{I}_{n\Sigma}$ jest w tym wypadku zmienną losową, której rozkład prawdopodobieństwa zależy od rozkładu amplitud i kątów wektorów prądów składowych oraz od liczby prostowników N .

Badając zatem rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej $\hat{I}_{n\Sigma}$ można oszacować jakie jest prawdopodobieństwo, że określona wartość wektora sumy $\hat{I}_{n\Sigma}$ nie zostanie przekroczona. Należy się, w tym wypadku, liczyć z ryzykiem. W celu wyznaczenia rozkładu prawdopodobieństwa wektora sumy $\hat{I}_{n\Sigma}$, a także dla uproszczenia obliczeń przyjmuje się [33], że dla wektora sumy $\hat{I}_{n\Sigma}$ mogą zajść trzy następujące przypadki:

- 1 - Wszystkie wektory prądów składowych mają ten sam kąt fazowy φ_n , a zmienia się jedynie wartość ich amplitudy I_{xn} (rys. 4.3a).
- 2 - Wszystkie wektory prądów składowych mają tę samą amplitudę I_n , a zmienia się jedynie wartość ich kąta fazowego φ_{xn} (rys. 4.3b).
- 3 - Zmienia się wartość amplitud I_{xn} oraz kątów fazowych φ_{xn} wszystkich prostowników składowych (rys. 4.3c).

Ponieważ w typowych maszynach papierniczych z reguły z jednego transformatora zasilane są 2 lub 5 prostowników (załącznik) dlatego do obliczeń przyjęto taką właśnie liczbę prostowników. Wyznaczono także rozkłady prawdopodobieństwa wektora sumy $\hat{I}_{n\Sigma}$ dla większej liczby prostowników, tj. dla 20 i 100 prostowników, w celu wykazania wpływu liczby prostowników na ich wypadkową harmoniczną.

Przyjęto, że amplituda I_{xn} jest zmienną losową o rozkładzie jednostajnym w przedziale $(0, 1)$

$$I_{xn} \sim U(0, 1) \quad (4.7)$$

oraz, że kąt fazowy φ_{xn} posiada także rozkład jednostajny w przedziale $(0^\circ, 360^\circ)$

$$\varphi_{xn} \sim U(0, 360^\circ) \quad (4.8)$$

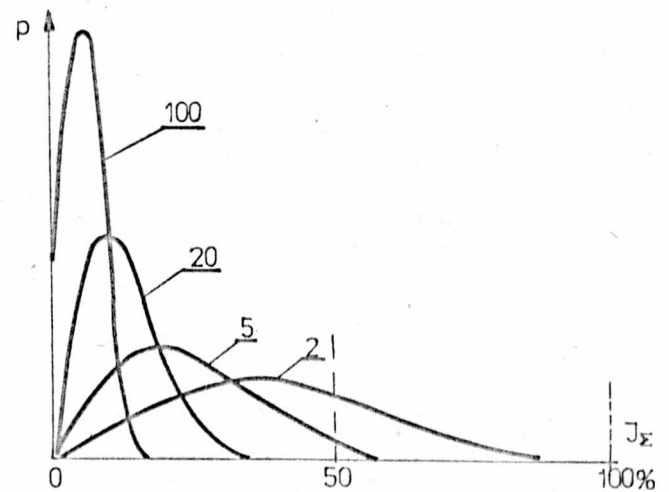
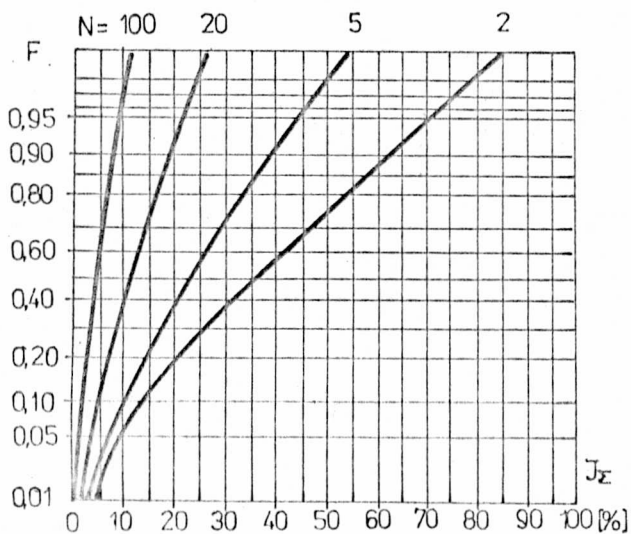
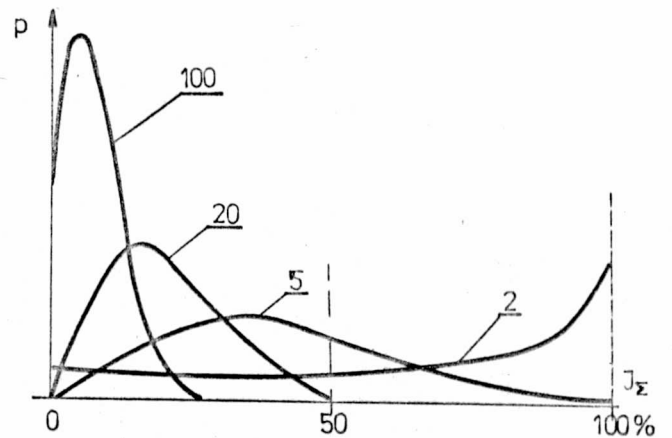
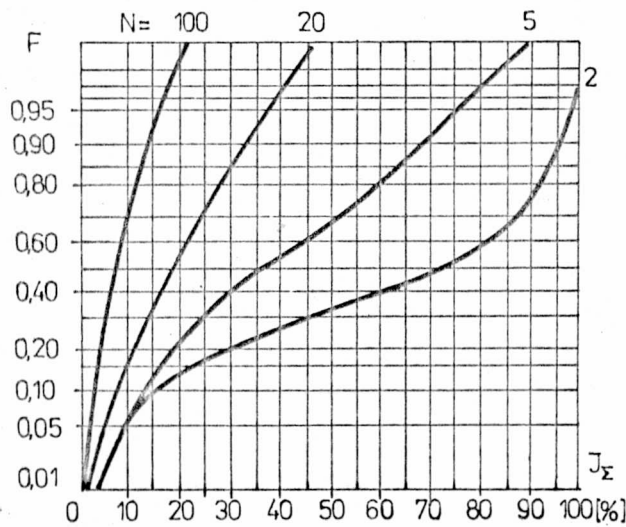
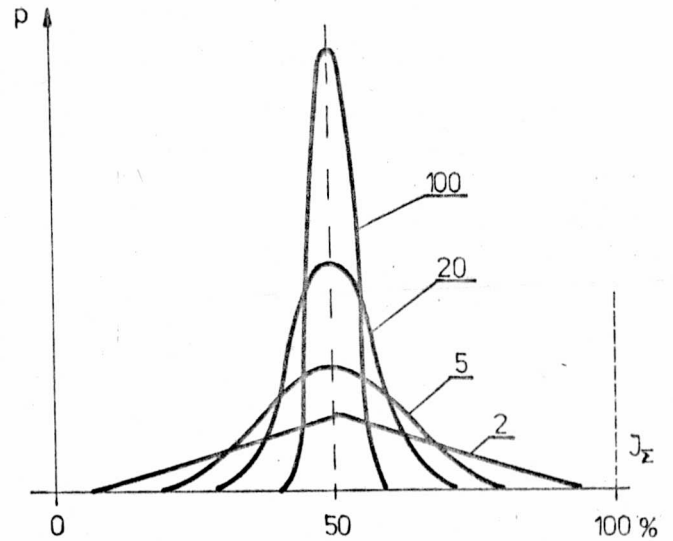
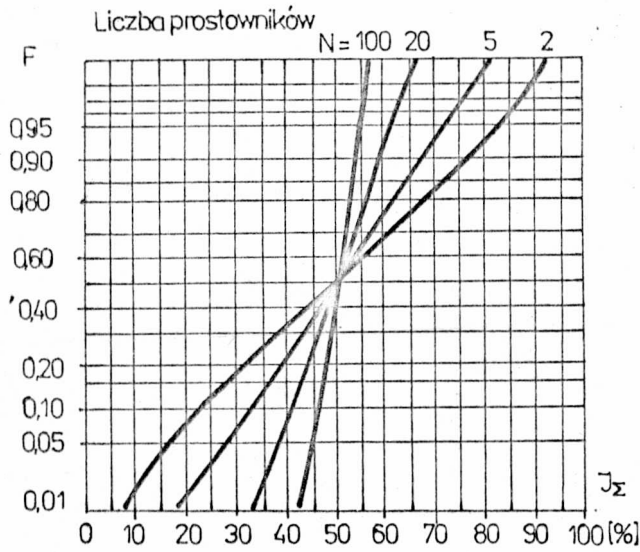
Rozkłady prawdopodobieństwa, wyznaczone na podstawie powyższych założeń, naniesiono na płaszczyznę prawdopodobieństwa i przedstawiono na rysunku 4.3. Na rysunku tym przedstawiono też wykresy gęstości prawdopodobieństwa dla rozważanych przypadków.

Z wykresów tych wysnuć można następujące wnioski:

a) dla stałej wartości kąta fazowego φ_n harmonicznym składowych:

- rozkład prawdopodobieństwa wektora sumy $\hat{I}_{\Sigma}$ jest symetryczny względem środka płaszczyzny prawdopodobieństwa, można go więc aproksymować rozkładem Gaussa (twierdzenie o wartościach granicznych),

- rozkład dla liczby prostowników większej niż 5 ma przebieg liniowy,



Rys.4.3. Rozkłady prawdopodobieństwa oraz przebiegi gęstości prawdopodobieństwa wektora sumy I_{Σ} dla trzech omawianych przypadków, gdzie: F - rozkład prawdopodobieństwa wektora sumy I_{Σ} , p - gęstość prawdopodobieństwa wektora sumy Σ_{Σ} , I_{Σ} - wektor sumy w procentach sumy arytmetycznej

- wartość sumy prądów harmoniczných ze wzorstem liczby prostowników koncentruje się wokół 50% sumy arytmetycznej;

b) dla stałej wartości amplitud I_n harmoniczných składowych:

- rozkład prawdopodobieństwa wektora sumy dla 2, 5, 20 i 100 prostowników ma przebieg nieliniowy,

- wartość sumy prądów harmoniczných ze wzrostem liczby prostowników maleje w stosunku do sumy arytmetycznej osiągając dla 100 prostowników 23% wartości sumy arytmetycznej, przy prawdopodobieństwie 0,99;

c) dla zmiennej wartości amplitud I_n oraz kątów fazowych φ_n harmoniczných składowych:

- rozkład prawdopodobieństwa wektora sumy $\hat{I}_\Sigma$ jest liniowy dla 20 i 100 prostowników,

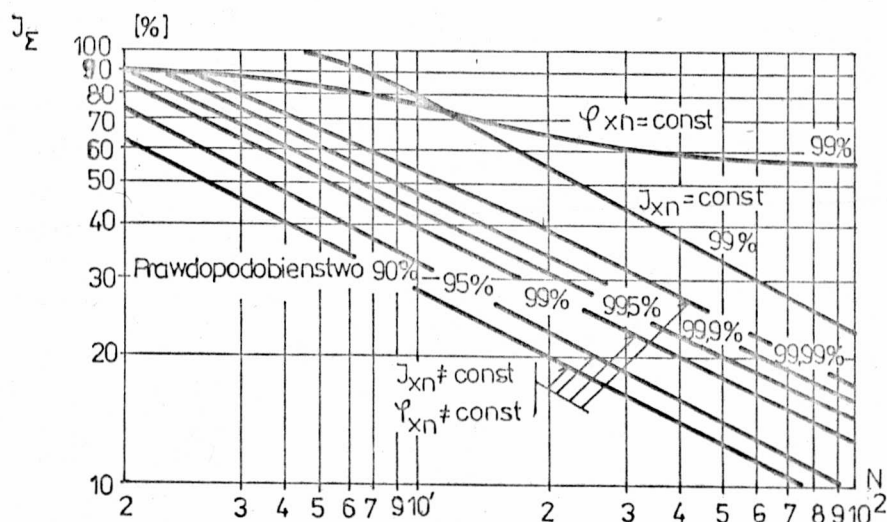
- rozkład prawdopodobieństwa jest liniowy dla 2 i 5 prostowników począwszy od 20% ich sumy arytmetycznej,

- prawdopodobieństwo, że wektor sumy $\hat{I}_\Sigma$ osiągnie wartość równą sumie arytmetycznej harmoniczných składowych jest mniejsze niż 1%.

Dodatkowo na rysunku 4.4 przedstawiono wykres zależności wektora sumy $\hat{I}_\Sigma$ od liczby zasilanych prostowników dla wybranych wartości prawdopodobieństwa wg Klossa. Na jego podstawie można określić ryzyko^{*)} jakie ponosimy przyjmując wartość wektora sumy I_Σ odpowiednio mniejszą w stosunku do sumy arytmetycznej.

Reasumując można stwierdzić, że prawdopodobieństwo uzyskania sumy arytmetycznej wektorów składowych jest niewielkie, w związku z tym obliczanie wypadkowego prądu kilku prostowników zgodnie z zasadą "najgorszego przypadku" jest nieuzasadnione i prowadzi do nadmiernego oszacowania prądu wypadkowego.

^{*)} Przez ryzyko autor określa prawdopodobieństwo, że wektor sumy $\hat{I}_\Sigma$ w układzie rzeczywistym przekroczy wartość wyznaczoną analitycznie $\text{ryzyko} = 1 - p$



Rys.4.4. Zależność wektora sumy I_{Σ} od ilości zasilanych prostowników N dla wybranych wartości prawdopodobieństwa

4.3. Weryfikacja pomiarowa statystycznych metod określania wypadkowej harmonicznej prądu kilku prostowników

W celu weryfikacji statystycznych metod wyznaczania wypadkowego prądu harmonicznej rzędu n kilku prostowników wykonano badania tyrystorowych napędów maszyn papierniczych. Wyniki badań są analizowane i szeroko komentowane w rozdziale 7. Dla potrzeb niniejszego rozdziału przykładowo przeanalizowano pod kątem wypadkowego oddziaływania na sieć zasilającą napędy sita i pras maszyny papierniczej MP-V w Świeciu.

Przyjmując, że w trakcie pracy maszyny papierniczej obciążenie zmienia się należy założyć, że zmieniają się również amplitudy i fazy harmonicznych wprowadzanych do sieci zasilającej przez napęd tyrystorowy (przypadek c) z paragrafu 4.2.2). Napęd elektryczny sita i pras zasilany jest z dwóch prostowników tyrystorowych przyłączonych do wtórnej strony tego samego transformatora.

Korzystając z rysunku 4.4 można wyznaczyć spodziewaną wartość sumy harmonicznych pochodzących od tych dwóch prostowników przy określonym prawdopodobieństwie. Zatem zakładając małe ryzyko rzędu 0,5 do 1% należy liczyć się z tym, że wartość sumy harmonicznej wypadkowej dwóch prostowników

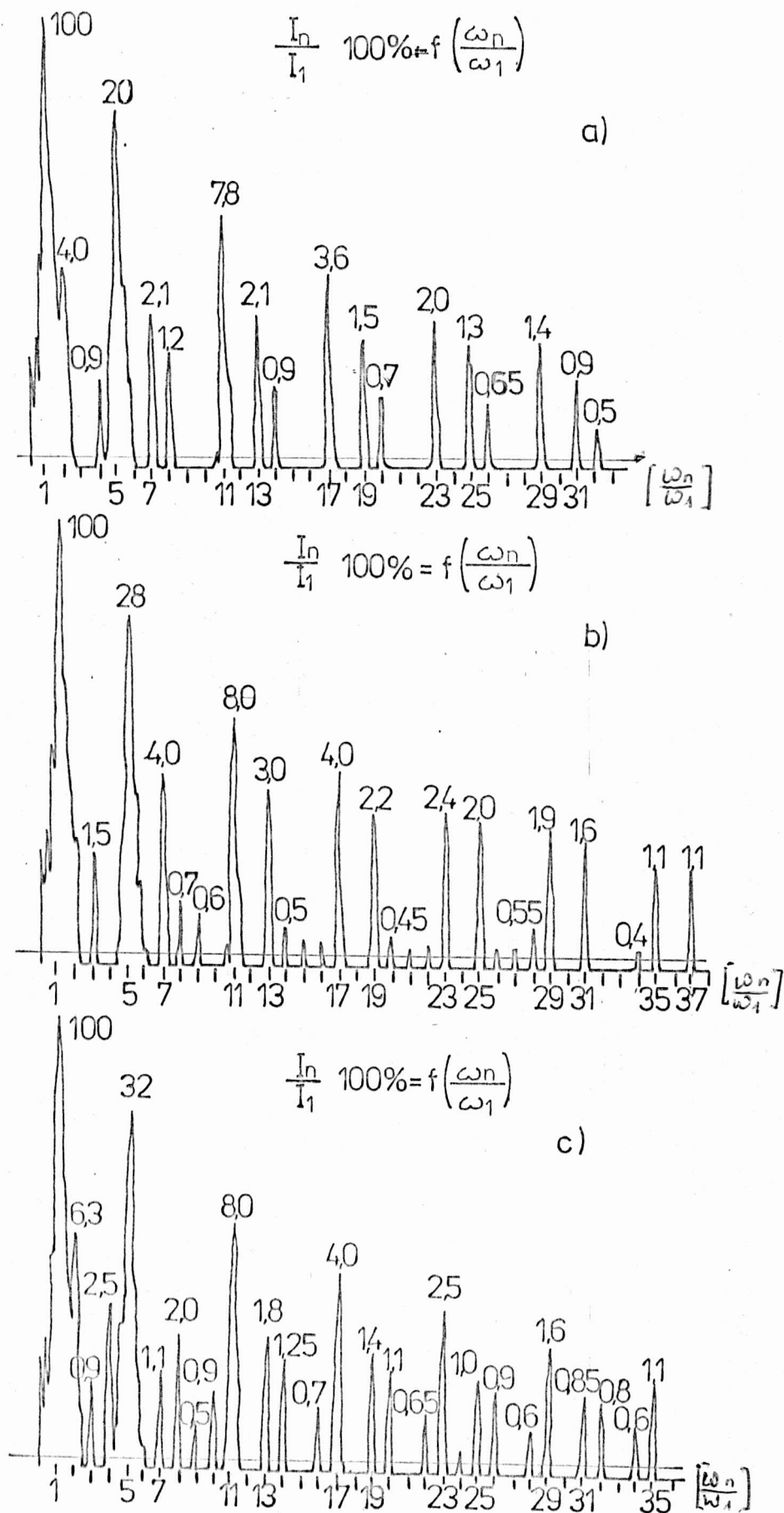
stanowić będzie ok. 90% ich sumy arytmetycznej (rys. 4.4). Na rysunku 4.5 przedstawiono widma przebiegów prądu zasilającego napęd sita i napęd pras oraz widmo prądu sumarycznego zasilającego obie te sekcje. Na tej podstawie wyznaczono sumy arytmetyczne oraz rzeczywiste (wektorowe) odniesione do sumy arytmetycznej wybranych harmoniczných. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.1.

T a b e l a 4.1.

Wartości skuteczne harmoniczných prądu napędu pras i sita oraz ich sumy arytmetyczne i wektorowe (Prąd napędu pras $I_{Tsk}=470$ A; prąd napędu sita $I_{Tsk}=530$ A; prąd napędu obu sekcji $I_{Tsk}=980$ A)

Rząd harmoniczných n	Sekcja pras Wartość skuteczna prądu harmoniczných I_{Tsk} [A]	Sekcja sitowa Wartość skuteczna prądu harmoniczných I_{Tsk} [A]	Zasilanie obu sekcji Wartość skuteczna prądu harmoniczných I_{Tsk} [A]	Suma arytmetyczna prądów harmoniczných obu sekcji $I_{\Sigma sk}$ [A]	Suma wektorowa odniesiona do sumy arytmetycznej $\hat{I}_{\Sigma}$ [%]
5	131,6	169,6	274,4	301,2	91,1
7	18,8	5,8	20,6	24,6	83,7
11	37,6	42,4	76,4	80,0	95,5
13	14,1	9,5	20,6	23,6	87,3
17	18,8	21,2	35,3	40,0	88,2
19	10,3	7,4	14,7	17,7	83,0
23	11,3	13,2	19,6	24,5	80,0
25	9,4	5,3	12,7	14,7	86,4

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń (tab. 4.1) dla harmoniczných wybranych rzędów prądy wypadkowe dwóch prostowników stanowią około 90 i mniej procentów sum arytmetycznych harmoniczných składowych. Jest to zgodne z wynikiem uzyskanym na podstawie badań statystycznych i stanowi potwierdzenie przydatności przedstawionej metody statystycznego wyznaczania wypadkowej harmoniczných kilku prostowników.



Rys.4.5. Widma przebiegów prądów zasila-
jących:

- a) sekcję sito-
wą i sekcję
pras
- b) sekcję pras
- c) sekcję sito-
wą

4.4. Podsumowanie

Wyznaczenie wartości wypadkowej harmonicznej rzędu n grupy prostowników jest zagadnieniem skomplikowanym i wymaga żmudnych obliczeń. Jest jednak na tyle ważne, że nie można go pominąć w trakcie analizy oddziaływania prostowników tyrystorowych na sieć zasilającą. Wydaje się, że najskuteczniejszymi metodami badania wektora sumy I_{Σ} kilku prostowników są metody statystyczne.

Opracowana przez autora metoda statystyczna pozwala oszacować wartość wypadkowego prądu harmonicznej o kilka prostowników. Jej przydatność została potwierdzona pomiarami na obiekcie rzeczywistym. Stosowanie zgodnie z zasadą "najgorszego przypadku" sumy arytmetycznej prowadzi do zawyżenia rzeczywistej wartości wypadkowego prądu harmonicznego i jest nieuzasadnione z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia. Wyniki przeprowadzonej analizy oraz pomiarów na obiekcie rzeczywistym stanowią potwierdzenie jednej z tez postawionych na wstępie pracy.

5. WPŁYW PRACY NAPĘDÓW PROSTOWNIKOWYCH NA KSZTAŁT KRZYWEJ NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO

5.1. Wstęp

W rozdziałach poprzednich omawiany był jeden aspekt niekorzystnego oddziaływania prostowników tyrystorowych na sieć zasilającą, tj. pobieranie przez prostowniki znacznie odkształconego prądu. Stwierdzono mianowicie, że prostownik pobiera z sieci prąd o określonym widmie wyższych harmonicznych zarówno charakterystycznych, jak i niecharakterystycznych dla danej liczby pulsów oraz o określonych względnych amplitudach prądów poszczególnych harmonicznych, wynikających z warunków jego pracy (obciążenie, kąty komutacji i zapłonu). Wynika stąd, że w założonych warunkach pracy, z wystarczającą dokładnością można traktować prostownik jako źródło prądów harmonicznych o znanym wymuszeniu [15,19]. Prądy harmoniczne wymuszane przez prostownik obciążają sieć zasilającą, wywołując spadki napięć harmonicznych na jej elementach. Spadki napięć harmonicznych nakładają się na sinusoidę podstawową napięcia, powodując jej odkształcenie. Wartość n -tej harmonicznej napięcia w danym punkcie sieci równa jest liczbowo spadkowi napięcia tej harmonicznej liczonemu od źródła zasilania od rozpatrywanego punktu [27,53]. Wynika stąd, że wartość harmonicznej napięcia w punkcie przyłączenia prostownika najłatwiej jest obliczyć mnożąc wymuszony prąd harmoniczny prostownika przez impedancję zastępczą układu dla rozpatrywanej harmonicznej odniesioną do tego punktu. Pojawia się tu jednak problem wyznaczenia impedancji zastępczych układu, bowiem nie ma jednoznacznych kryteriów określających wpływ przyjętego modelu układu zasilającego na wyniki uzyskane w trakcie analizy. Najczęściej przyjmuje się model indukcyjny sieci, w którym wszystkie elementy sieci i odbiorniki zastępuje się przez odpowiednio obliczone impedancje. Następnie wyznacza się charakterystykę częstotliwościową modułu impedancji i znając wartości amplitud poszczególnych harmonicznych prądu wyznacza się harmoniczne napięcia. Metoda ta, jak wspomniano, bywa kłopotliwa ze względu na trudności z wyznaczeniem impedancji zastępczej

układu zasilającego, szczególnie na etapie projektowania napędu prostownikowego. W związku z tym korzystnym wydaje się dysponowanie metodą pozwalającą na wyznaczenie harmoniczných napięcia jedynie w oparciu o takie dane, jak: napięcie zwarcia transformatora prostownikowego u_z , moc zwarciovą sieci zasilającej S_z oraz parametry obwodu obciążenia prostownika, czyli w oparciu o takie same dane, jak przy wyznaczaniu widma prądu zasilającego.

5.2. Metoda wyznaczania współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ zasilającego prostowniki sześciopulsowe

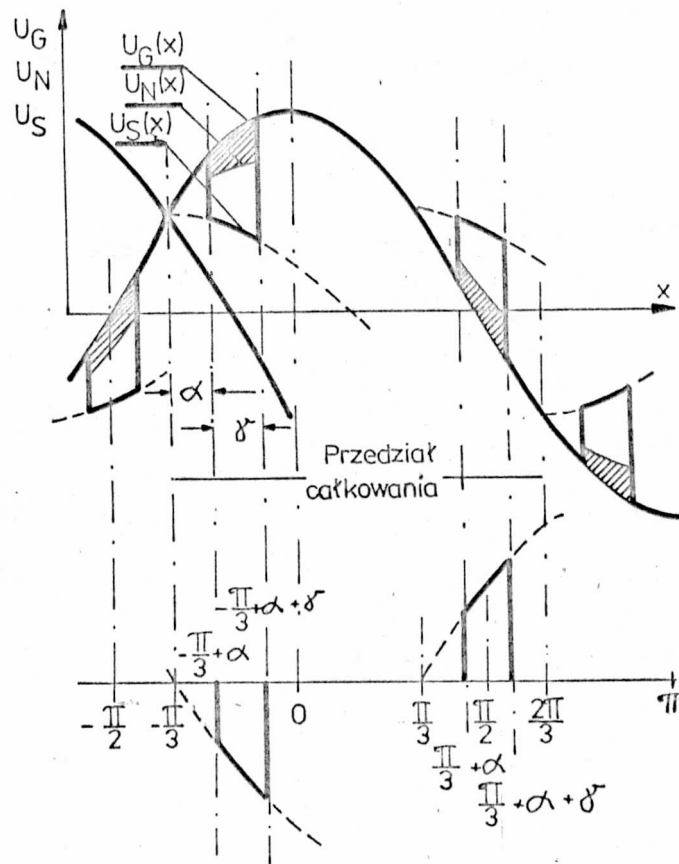
Przy założeniu, że prąd obciążenia jest idealnie stały, napięcie zasilające sinusoidalne, elementy prostownika idealne można stwierdzić, że odkształcenie napięcia zasilającego prostownik jest następstwem jedynie zjawisk komutacyjnych. Innymi słowy występuje ono jedynie w czasie trwania komutacji. Czasowy przebieg napięcia fazowego $u_s(x)$ (od strony sieci) przy powyższych założeniach został przedstawiony na rysunku 5.1. Pole zakreskowane na tym rysunku określa zawartość wyższych harmoniczných w napięciu zasilającym.

Na rysunku 2.5 przedstawiony był schemat ideowy prostownika sześciopulsowego wraz z układem zasilania. Podział reaktancji komutacyjnej X_K na reaktancję sieci zasilającej X_N oraz reaktancję transformatora prostownikowego i dławików komutacyjnych X_T zaproponowali E. Uhlman [52] i niezależnie W. Schilling [8]. Pozwala to na wyznaczenie widma napięcia zasilającego (u_s) po stronie wtórnej transformatora prostownikowego oraz widma napięcia u_N w punkcie przyłączenia prostownika do sieci zasilającej. Wraz z takim podziałem reaktancji został przez nich wprowadzony współczynnik podziału reaktancji komutacyjnej [8, 52]

$$K_u = \frac{X_N}{X_N + X_T} = \frac{K_Q}{1 - \cos \varphi_0} \quad (5.1)$$

gdzie

$$1 - \cos \varphi_0 = u_z + K_Q \quad (5.2)$$



Rys.5.1. Przebieg napięcia zasilającego prostownik sześciopulsowy

Współczynnik K_Q jest stosunkiem idealnej mocy wyjściowej prostownika P_{α_i} do mocy zwarcia S_Z sieci zasilającej w punkcie przyłączenia prostownika

$$K_Q = \frac{P_{\alpha_i}}{S_Z} \quad (5.3)$$

Współczynniki te wiążą z sobą parametry układu zasilającego i układu obciążenia prostownika. Najkorzystniej byłoby więc wyznaczyć "zawartość" wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym γ jako funkcję współczynników K_Q i K_U .

Do wyznaczenia widma napięcia zasilającego zastosowano, tak jak w przypadku analizy prądów zasilających, teorię szeregu Fouriera. Skorzystano z trygonometrycznej postaci szeregu Fouriera. Aby wyznaczyć amplitudy wyrazów sinusoidalnych i cosinusoidalnych szeregu Fouriera wykorzystano wzory

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx \, dx,$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx \, dx.$$

Ponieważ przebieg napięcia zasilającego jest symetryczny, wystarczy wykonać całkowanie w jednym półokresie. Granice całkowania wyznaczono z rysunku 5.1. W ten sposób składniki U_{nA} i U_{nB} określone są następująco

$$\frac{U_{nA}}{U_G} = (-) \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma}^{-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma} \sin(x + \frac{\pi}{3}) \cos nx \, dx - \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma} \sin(x - \frac{\pi}{3}) \cos nx \, dx \right] \quad (5.4)$$

$$\frac{U_{nB}}{U_G} = (-) \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{3} + \alpha}^{-\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma} \sin(x + \frac{\pi}{3}) \sin nx \, dx - \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{\pi}{3} + \alpha + \gamma} \sin(x - \frac{\pi}{3}) \sin nx \, dx \right]$$

Dla harmonicznych napięcia o rzędach $n > 1$ rozwiązanie całek (5.4) przyjmuje postać

$$\frac{U_{nA}}{U_G} = \frac{3}{\pi(n^2 - 1)} \left\{ n \left[\sin(\alpha + \gamma) \cos n(\alpha + \gamma) - \sin \alpha \cdot \cos n\alpha \right] + \right. \\ \left. - \left[\cos(\alpha + \gamma) \sin n(\alpha + \gamma) - \cos \alpha \sin n\alpha \right] \right\}, \quad (5.5)$$

$$\frac{U_{nB}}{U_G} = \frac{3}{\pi(n^2 - 1)} \left\{ n \left[\sin(\alpha + \gamma) \sin n(\alpha + \gamma) - \sin \alpha \sin n\alpha \right] + \right. \\ \left. - \left[\cos(\alpha + \gamma) \cos n(\alpha + \gamma) - \cos \alpha \cos n\alpha \right] \right\}.$$

Widmo napięcia zasilającego U_{nS} określone jest zależnością

$$\left(\frac{U_{nS}}{U_G} \right)^2 = \left(\frac{U_{nA}}{U_G} \right)^2 + \left(\frac{U_{nB}}{U_G} \right)^2$$

czyli

$$\frac{U_{nS}}{U_G} = \frac{3}{\pi(n^2-1)} \left\{ n^2 \left[\sin(\alpha+\gamma) + \sin \alpha \right]^2 + \left[\cos(\alpha+\gamma) + \cos \alpha \right]^2 + \right. \\ \left. - 2 \left[(1+\cos n\gamma) (n^2 \sin(\alpha+\gamma) \sin \alpha + \cos(\alpha+\gamma) \cos \alpha) + \right. \right. \\ \left. \left. + n \sin \gamma \sin n\gamma \right] \right\}^{1/2}. \quad (5.6)$$

Dla prostownika niesterowanego $\alpha=0$ kąt komutacji $\gamma=\gamma_0$ jest w tym wypadku największy. Podstawiając te wielkości do równania (5.6) otrzymano

$$\frac{U_{nS}}{U_G} = \frac{3}{\pi(n^2-1)} \left\{ n^2 \sin \gamma_0 + (1+\cos \gamma_0)^2 - 2 \left[(1+\cos n\gamma_0) \cos \gamma_0 + \right. \right. \\ \left. \left. + n \sin \gamma_0 \sin n\gamma_0 \right] \right\}^{1/2}. \quad (5.7)$$

Z drugiej strony minimalny kąt komutacji występuje przy kącie sterowania $\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2}$. Napięcie wyjściowe prostownika jest w tym wypadku równe zero. Dla kąta sterowania $\alpha=\alpha_0$ otrzymuje się więc $\gamma = \pi - 2 \arccos \cos \frac{1}{2}(1-\cos \gamma_0)$, a tym samym

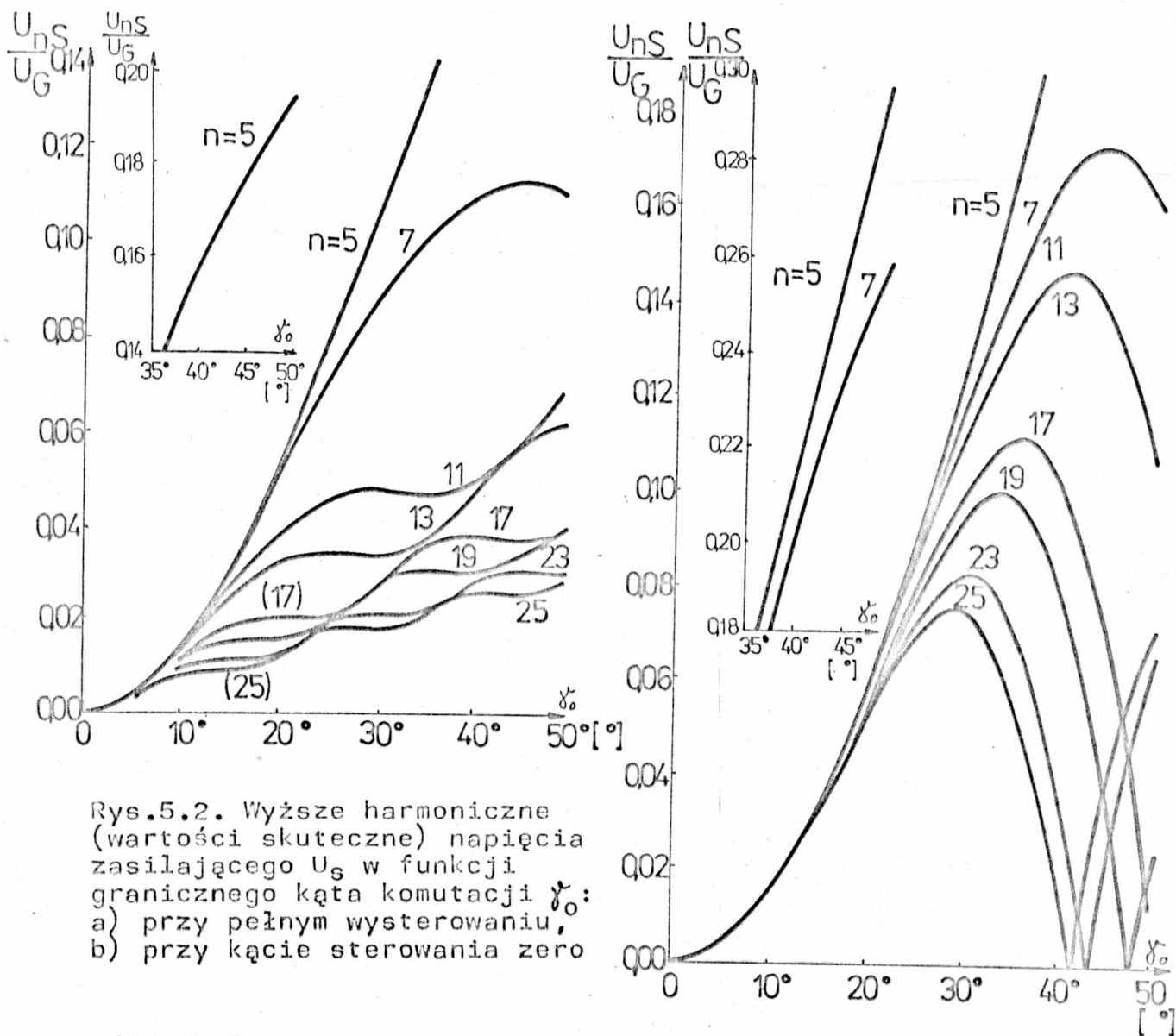
$$\frac{U_{nS}}{U_G} = \frac{3}{\pi(n^2-1)} \left[n^2 (1+\cos \gamma) (1-\cos n\gamma) + (1-\cos \gamma) (1+\cos n\gamma) + \right. \\ \left. - 2n \sin \gamma \sin n\gamma \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

Na rysunku 5.2 pokazano graficzną interpretację wzorów (5.7) i (5.8) w funkcji granicznego kąta komutacji γ_0 .

Poszukiwaną wartość harmonicznego napięcia U_{nN} odniesioną do napięcia U_G można uzyskać mnożąc wartości odczytane z rysunku 5.2 lub wyznaczone przy pomocy wzoru (5.6) przez współczynnik K_u .

W praktyce istotny jest jednak związek parametrów wyższych harmoniczych z wartością skuteczną napięcia U_N , która może być zmierzona jedynie w miejscu podłączenia prostownika do sieci. W tym celu wartość U_{nN}/U_G należy podzielić przez wartość U_N/U_G . Na podstawie definicji wartości skutecznej można zapisać

$$\frac{U_N}{U_G} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{u_N(x)}{U_G} dx \right]^{1/2} \quad (5.9)$$



przy czym

$$\frac{U_N(x)}{U_G} = \frac{U_G(x)}{U_G} - K_Q \frac{1}{I_w} \frac{d}{dx} i_w(x)$$

Szczegółowe rozwiązanie całki (5.9) dla prostownika o pulsacji m [12,40] ma postać

$$\frac{U_N}{U_G} = \left[1 - K_Q \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \left(2 - \frac{2K_Q \sin \frac{\pi}{m}}{1 - \cos \gamma_o} \right) \chi_{\alpha, \gamma} \right]^{1/2} \quad (*) \quad (5.10)$$

*) Funkcja $\chi_{\alpha, \gamma}$ jest funkcją mocy biernej [4,7,9] określoną w następujący sposób

$$\chi_{\alpha, \gamma} = \frac{2\gamma + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \gamma)}{4(1 - \cos \gamma_o)} = \frac{Q_{1\alpha}}{P_{d1}}$$

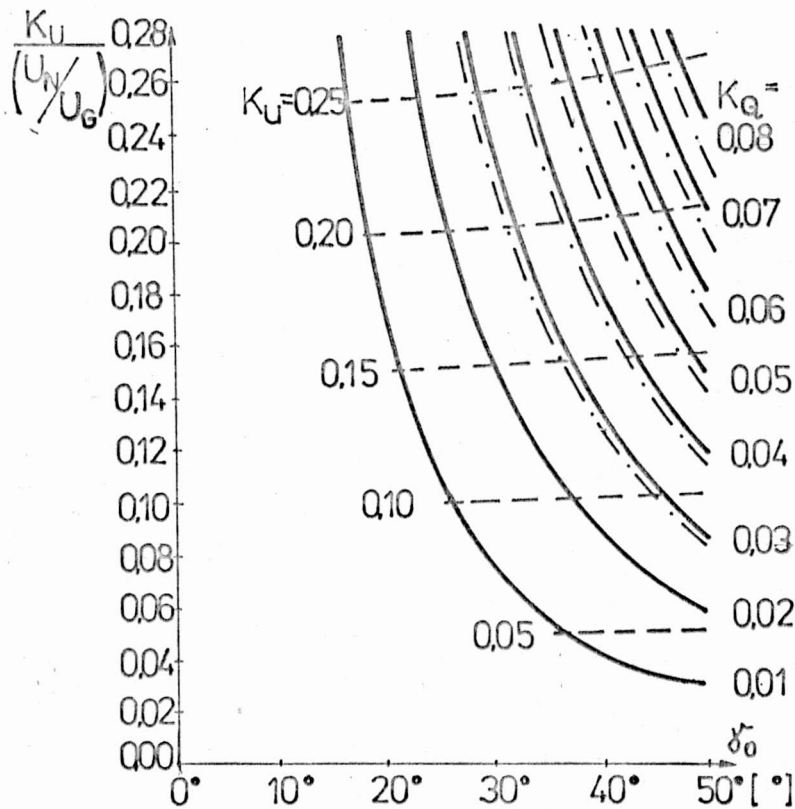
gdzie: $Q_{1\alpha}$ - moc bierna pierwszej harmonicznej dla kąta sterowania α

Dla prostownika sześciopulsowego $m=6$ otrzymuje się

$$\frac{U_N}{U_G} = \left[1 - \frac{3}{\pi} K_Q \left(2 - \frac{K_Q}{1 - \cos \gamma_0} \right) \chi_{\alpha, \gamma} \right]^{1/2} \quad (5.11)$$

Wyższe harmoniczne U_{nN} napięcia zasilającego, odniesione do wartości skutecznej tego napięcia U_N , policzono mnożąc wartości odczytane z rysunku 5.2 przez stosunek $K_U/(U_N/U_G)$.

Na rysunku 5.3 zamieszczono zależność tego stosunku od granicznego kąta komutacji γ_0 dla różnych wartości K_Q .



Rys.5.3. Zależność stosunku $K_U/(U_N/U_G)$ od granicznego kąta komutacji γ_0 dla różnych wartości współczynnika K_Q

Linie ciągłe na rys. 5.3 przedstawiają rodzinę krzywych mających za parametr współczynnik K_Q obliczony dla $\alpha = \alpha_0$.

Linie kreskowe przedstawiają natomiast rodzinę krzywych mających za parametr również współczynnik K_Q , lecz obliczony dla $\alpha = 0$. Jak widać rodziny krzywych niewiele różnią się, a dla małych wartości współczynnika K_Q wręcz pokrywają się.

Linie przerywane dotyczą rodziny krzywych, dla których parametrem jest współczynnik K_u wyznaczony dla $\alpha = \alpha_0$. Krzywe te wykazują tendencję wzrostu dla rosnących wartości kąta γ_0 . Na rysunku nie podano krzywych, dla których współczynnik K_u wyznaczony jest dla $\alpha = 0$, gdyż jego wartości są bliskie zera ($K_u \approx 0$). Dla podstawowej harmonicznej napięcia ($n=1$) całkę z wzoru (5.4) należy rozwiązać odrębnie. Jako rozwiązanie otrzymuje się wzory określające amplitudy składników harmonicznej podstawowej zniekształconego napięcia zasilającego [7]

$$U_{1A} = - \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} (1 - \cos \gamma_0) \chi_{\alpha}, \quad (5.12)$$

$$U_{1B} = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} (1 - \cos \gamma_0) \mu_{\alpha, \gamma}^*)$$

Mnożąc składniki U_{1A} i U_{1B} przez współczynnik K_u i sprowadzając do poziomu U_G otrzymano [40]

$$\frac{U_{1NA}}{U_G} = \sqrt{2} \left(1 - \frac{3}{4\pi} K_Q \chi_{\alpha, \gamma} \right), \quad (5.13)$$

$$\frac{U_{1NB}}{U_G} = \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} K_Q \mu_{\alpha, \gamma}$$

Znak funkcji $\mu_{\alpha, \gamma}$ jest dodatni dla $\alpha < \alpha_0$, natomiast ujemny dla $\alpha > \alpha_0$, to samo dotyczy składników U_{1NB} . Funkcja $\chi_{\alpha, \gamma}$ przyjmuje natomiast tylko wartości dodatnie, tym samym składnik U_{1NA} może mieć też tylko wartość dodatnią.

Z powyższych rozważań wynika, że podstawowa harmoniczna napięcia $u_N(x)$ jest przesunięta o kąt σ względem harmonicznej podstawowej napięcia $u_G(x)$. Tangens kąta przesunięcia o wynosi więc

*) Funkcja $\mu_{\alpha, \gamma}$ jest funkcją wystrojenia [7,9] określoną w następujący sposób

$$\mu_{\alpha, \gamma} = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)].$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{3}{4\pi} K_Q \mu_{\alpha, \gamma}}{1 - \frac{3}{4\pi} K_Q \chi_{\alpha, \gamma}} \quad (5.14)$$

Na podstawie (5.13) wyznaczono wartość skuteczną harmonicznej podstawowej napięcia $u_N(x)$ odniesioną do napięcia U_G

$$\frac{U_{1N}}{U_G} = \left\{ 1 - \frac{3}{4\pi} [2\chi_{\alpha, \gamma} - \frac{3}{4\pi} K_Q (\mu_{\alpha, \gamma}^2 + \chi_{\alpha, \gamma}^2)] \right\}^{1/2} \quad (5.15)$$

Wartość skuteczną harmonicznej podstawowej napięcia $u_N(x)$ odniesioną do napięcia U_N wyznaczono podobnie jak dla harmonicznnych wyższych rzędów. Na podstawie wzorów (5.11) i (5.15) otrzymano

$$\frac{U_{1N}}{U_N} = \left\{ \frac{1 - \frac{3}{4\pi} K_Q [2\chi_{\alpha, \gamma} - \frac{3}{4\pi} K_Q (\mu_{\alpha, \gamma}^2 + \chi_{\alpha, \gamma}^2)]}{1 - \frac{3}{\pi} K_Q \chi_{\alpha, \gamma} (2 - \frac{K_Q}{1 - \cos \gamma_0})} \right\}^{1/2} \quad (5.16)$$

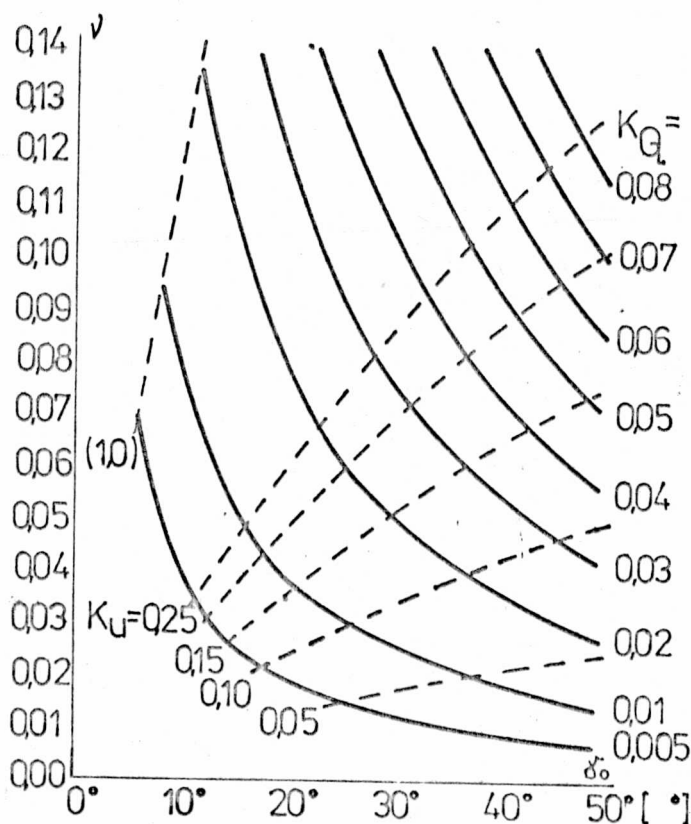
Dla kąta sterowania $\alpha = \alpha_0$ otrzymuje się najmniejszą wartość harmonicznej podstawowej. Dla tej wartości kąta sterowania funkcja $u_{\alpha, \gamma}$ jest praktycznie równa zero, natomiast funkcja $\chi_{\alpha, \gamma}$ jest równa 1. W związku z tym wzór (5.16) przyjmuje postać

$$\frac{U_{1N}}{U_N} \approx \left[\frac{1 - \frac{3}{4\pi} K_Q (2 - \frac{3}{4\pi} K_Q)}{1 - \frac{3}{4\pi} K_Q (2 - K_u)} \right]^{1/2} \quad (5.17)$$

Współczynnik odkształcenia krzywej napięcia wyznaczyć można korzystając z zależności $\gamma = \sqrt{1 - (U_{1N}/U_N)^2}$ oraz (5.17). Na tej podstawie otrzymano

$$\gamma = \left(\frac{K_u - \frac{3}{4\pi} K_Q}{K_u + \frac{4\pi}{3K_Q} - 2} \right)^{1/2} \quad (5.19)$$

Korzystając z równania (5.19) wykreślono rodzinę krzywych zależności współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ od granicznego kąta komutacji γ_0 i przy różnych wartościach K_Q i K_u , pokazaną na rysunku 5.4.



Rys.5.4. Zależność współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ od granicznego kąta komutacji δ_0 dla kąta sterowania $\alpha = 0$ i przy różnych K_Q i K_u

Krzywe przedstawione na rysunku 5.4 wykreślone zostały dla takich samych danych jak rysunku 5.3. Jak wynika z równania (5.19) współczynnik odkształcenia krzywej napięcia γ zależy jedynie od współczynników K_Q i K_u . Na podstawie ich znajomości wyznaczyć można całkowity współczynnik odkształcenia krzywej napięcia γ w punkcie przyłączenia prostownika do sieci zasilającej. Bezpośredni wpływ na wartość harmoniczných napięcia ma moc zwarciowa systemu, a właściwie stosunek mocy prostownika lub kilku prostowników do mocy zwarciowej w punkcie ich przyłączenia. Między napięciem generatora $u_G(x)$ a napięciem w punkcie przyłączenia prostownika do sieci zasilającej występuje przesunięcie o kąt δ . W celu sprawdzenia poprawności powyższej metody analizy napięcia zasilającego prostowniki przeprowadzono weryfikację pomiarową.

5.3. Weryfikacja pomiarowa metody wyznaczania współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ

W celu zweryfikowania przedstawionej metody wyznaczania współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ wykonano obliczenia dla napędu tyrystorowego maszyny MP-V w Świeciu.

Do obliczeń przyjęto następujące dane układu rzeczywistego:

- moc zwarcia na szynach 0,4 kV $S_Z = 5,4$ MVA,
- idealna moc napędu prostownikowego $P_{di} = 1,1$ MVA,
- kąt sterowania $\alpha = 60^\circ$,
- napięcie zwarcia transformatora prostownikowego $u_Z = 10\%$,
- prąd w obwodzie obciążenia prostownika $I_d = 980$ A.

Na tej podstawie wyznaczono współczynniki

$$K_Q = \frac{1,1 \text{ [MVA]}}{5,4 \text{ [MVA]}} = 0,20,$$

oraz

$$K_u = \frac{0,2}{0,1 + 0,2} = 0,67.$$

Graniczny kąt komutacji γ_o wyznaczono ze znanej zależności [9]

$$\gamma_o = \arccos \left[1 - \frac{2 I_d X_K}{\sqrt{6} U_m} \right]$$

Biorąc pod uwagę wymienione wyżej dane liczbowe układu rzeczywistego otrzymano

$$\gamma_o = 35,9^\circ$$

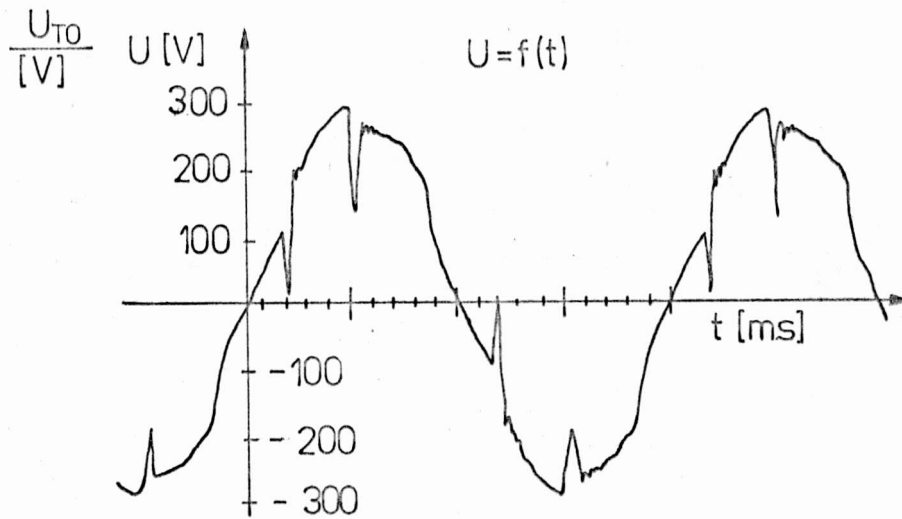
Następnie wyznaczono kąt komutacji γ również ze znanej zależności [9]

$$1 - \cos \gamma_o = \cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)$$

skąd dla danych liczbowych podanych wyżej otrzymano

$$\gamma = 11,9^\circ$$

Na rysunku 5.5 pokazano przebieg badanego napięcia fazowego u_{T0} zasilającego napęd tyrystorowy MP-V w Świeciu.



Rys.5.5. Przebieg napięcia fazowego u_{T0} zasilającego tyrystorowy układ napędowy MP-V w Świeciu

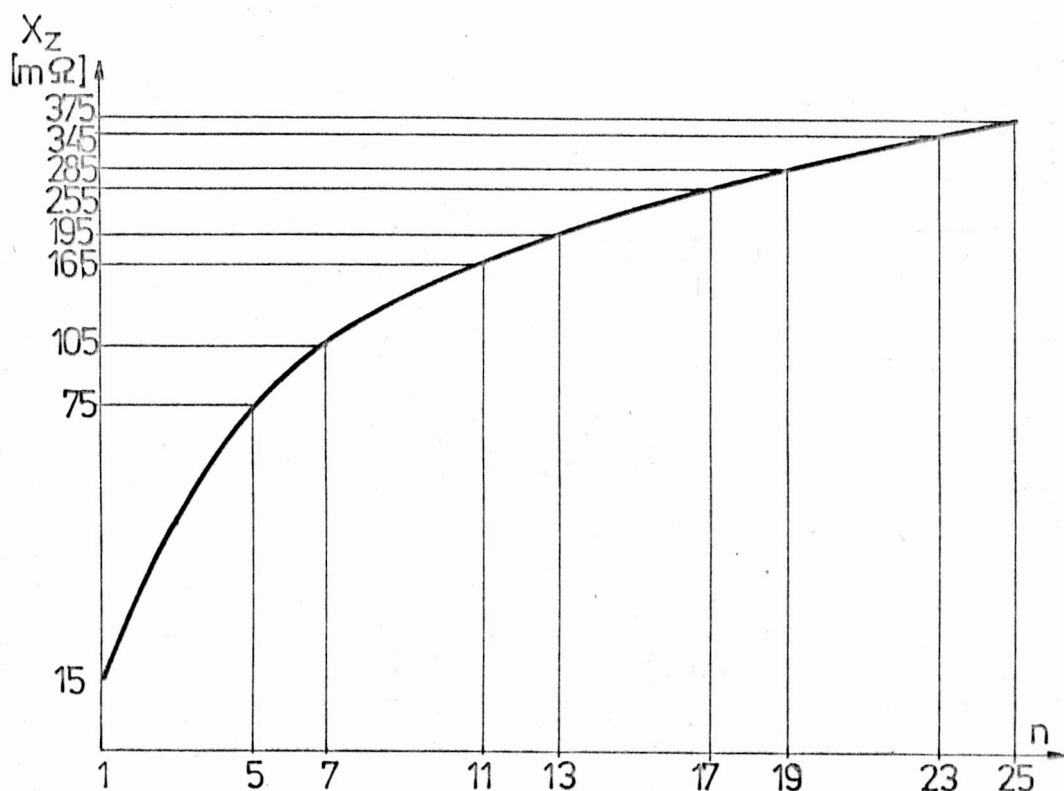
Kąt komutacji γ odczytany z rys. 5.5 wynosi $\gamma = 12,2^\circ$. Wartość kąta komutacji, obliczona wg powyższych zależności i rzeczywista otrzymana z pomiarów, różnią się więc nieznacznie. Na podstawie powyższych danych wyznaczono wg zależności (5.19) współczynnik odkształcenia krzywej napięcia

$$\gamma = 17,8\%$$

Następnie porównano go ze współczynnikiem γ przebiegu rzeczywistego, otrzymanym wg (6.1)

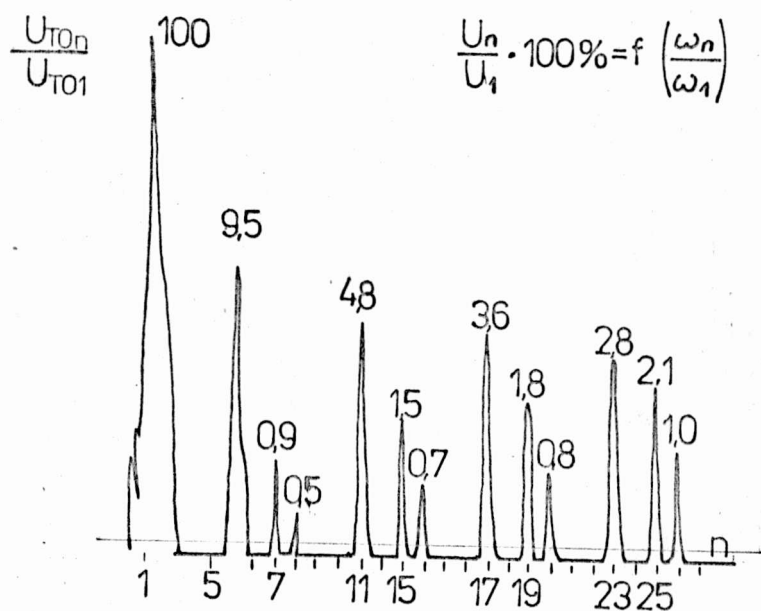
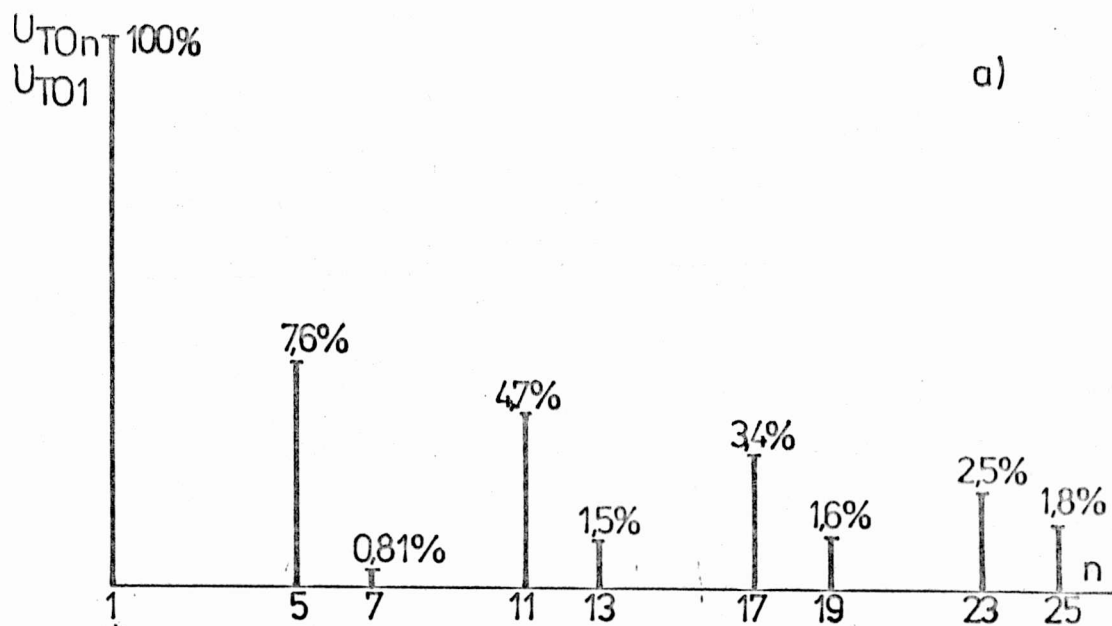
$$\gamma = 12,3\%$$

Jak widać, współczynnik γ wyznaczony analitycznie jest większy od rzeczywistego o około 30%. Tak duża różnica spowodowana jest faktem przyjęcia do analizy idealnie wygładzonego prądu obciążenia prostownika. Wpływ pulsacji prądu obciążenia na współczynnik odkształcenia krzywej napięcia jest więc duży. W dokładnych obliczeniach należy zatem przyjąć inną procedurę wyznaczania tego współczynnika, co będzie dalej wskazane. W tym celu należy sporządzić charakterystykę częstotliwościową impedancji zastępczej X_z układu zasilającego [22,36]. Dla badanego napędu prostownikowego MP-V w Świeciu przedstawia to rysunek 5.6.



Rys.5.6. Charakterystyka częstotliwościowa impedancji zastępczej $X_z=f(n)$ zasilania napędu tyrystorowego MP-V w Świeciu

Następnie zaś należy wyznaczyć widmo prądu pobieranego z sieci zasilającej przez prostownik (rozdz. 2.3, rys. 2.6-2.8) i na tej podstawie wyznaczyć widmo napięcia zasilającego. Na rysunku 5.7 przedstawiono widmo napięcia zasilającego wyznaczone w ten sposób, a dla porównania widmo przebiegu rzeczywistego. Różnice amplitud poszczególnych harmonicznych wyznaczonych analitycznie i amplitud przebiegu rzeczywistego nie przekraczają 16%. Przy obliczeniach dokładnych należy więc wyznaczyć widmo odkształconego przebiegu napięcia zasilającego w oparciu o impedancję zastępczą układu zasilającego i widmo prądu zasilającego prostownik.



$$\frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% = f\left(\frac{\omega_n}{\omega_1}\right)$$

Rys.5.7. Widmo napięcia fazowego u_{TO} zasilającego napęd tyrystorowy MP-V w Świeciu:
a) wyznaczone analitycznie
b) rzeczywiste

5.4. Podsumowanie

Przedstawiono metodę wyznaczania współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ w zależności od dwóch współczynników K_Q i K_U . Współczynnik K_Q jest zależny od stosunku mocy zainstalowanej w prostownikach do mocy zwarcia układu zasilającego.

Współczynnik K_u zależy natomiast od impedancji systemu zasilającego i odległości prostownika od punktu przyłączenia go do systemu. Metoda pozwala na łatwe wyznaczenie współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ przy zachowaniu dokładności około 30%. Jest to dokładność wystarczająca dla celów praktyki inżynierskiej. Powyższa różnica spowodowana jest faktem nieuwzględnienia w trakcie analizy pulsacji prądu obciążenia, co ograniczyło rozważania jedynie do przedziałów komutacji. Przy dokładnej analizie należy posłużyć się widmem prądu zasilającego i charakterystyką częstotliwościową impedancji układu w celu wyznaczenia widma i współczynnika niesinusoidalności napięcia zasilającego.

Należy zaznaczyć, że tak, jak przy analizie prądu zasilającego, najistotniejsza jest znajomość jego widma, co wiąże się z ewentualnym zastosowaniem filtrów lub innych układów odkłócających, tak przy analizie napięcia zasilającego ważna jest znajomość współczynnika odkształcenia krzywej napięcia γ .

Konkludując można stwierdzić, że obie metody mogą stanowić praktyczne narzędzie pomocne przy wyznaczaniu wymaganych parametrów układu zasilającego, zarówno na etapie projektowania, jak i w trakcie eksploatacji pracujących układów. W świetle powyższych uwag, a także na podstawie wniosków rozdziału 2 można stwierdzić, że tym sposobem pierwsza z postawionych na wstępie pracy tez została w pełni udowodniona.

6. BADANIA PRZEMYSŁOWE WYŻSZYCH HARMONICZNYCH PRĄDU I NAPIĘCIA, POBIERANYCH Z SIECI ZASILAJĄCEJ PRZEZ NAPĘDY TYRYSTOROWE MASZYN PAPIERNICZYCH

6.1. Uwagi ogólne

Badania przemysłowe, dotyczące oddziaływania napędów prostownikowych maszyn papierniczych na sieć zasilającą, nie były dotąd (1982 r.) przeprowadzane w Polsce. Są to więc pierwsze tego typu badania w kraju wykonane w przemyśle papierniczym. Pomiarы obejmują rejestrację prądów i napięć w obwodach zasilania prostowników tyrystorowych i dokonane były podczas normalnej pracy maszyn papierniczych, tak że odzwierciedlają rzeczywisty stan zakłóceń wywoływanych w sieci zasilającej przez prostowniki tyrystorowe.

Badania wykonane dla celów niniejszej pracy posiadają dodatkową zaletę. Dotychczasowe pomiary - dla napędów maszyn wyciągowych lub walcowni - wykonywane były jedynie po pierwotnej stronie transformatorów przekształtnikowych [16,19]. Tutaj pomiary przeprowadzono również po wtórnej stronie transformatorów prostownikowych. Ma to bardzo duże znaczenie, gdyż układy sterowania prostowników zasilane są poprzez te same transformatory co obwody główne prostowników, tzn. napięciem znacznie odkształconym.

Pomiary przeprowadzono w Zakładach Celulozy i Papieru (ZCiP) w Świeciu n/Wisłą oraz w Szczecińskich Zakładach Papierniczych (SZP) "Skolwin" w Szczecinie.

Wybór takich zakładów podyktowany był chęcią porównania stopnia zakłóceń wywoływanych przez napędy tyrystorowe w sieci wewnętrznej zakładu w przypadku małej i dużej mocy zainstalowanej w przekształtnikach statycznych. Zakłady Celulozy i Papieru w Świeciu są obecnie największym zakładem papierniczym w Polsce i posiadają największą w kraju moc zainstalowaną w przekształtnikach tyrystorowych sięgającą ok. 40% całkowitej mocy zainstalowanej w obiekcie. Szczecińskie Zakłady Papiernicze są natomiast zakładem o wyraźnej przewadze odbiorców indukcyjnych. Moc zainstalowana w przekształtnikach wynosi ok. 15% całkowitej mocy zainstalowanej w obiekcie.

Drugim powodem, dla którego autor świadomie wybrał do badań te właśnie zakłady był fakt, że napędy tyrystorowe maszyn papierniczych MP-IV i MP-V w ZCiP w Świeciu pracowały bez zakłóceń, natomiast napęd tyrystorowy maszyny papierniczej MP-2 w SZP w Skolwinie okresowo pracował niestabilnie oraz uniemożliwiał niekiedy zsynchronizowanie pracy poszczególnych sekcji maszyny papierniczej. Istniała więc uzasadniona obawa, potwierdzona w trakcie pomiarów, że powyższe zakłócenia w pracy MP-2 w SZP w Skolwinie są wynikiem dużej zawartości wyższych harmoniczných w napięciu i prądzie zasilającym napęd przekształtnikowy. Badania powyższe wykonane zostały przez Instytut Układów Elektromaszynowych Politechniki Wrocławskiej z inicjatywy autora, który dla potrzeb tej rozprawy ułożył ich program. W wykonaniu badań, z uwagi na aparaturę pomiarową, współpracował Zakład Energetyczny w Katowicach oraz Instytut Maszyn i Sterowania Układów Elektroenergetycznych AGH w Krakowie.

6.2. Pomiary odkształcenia prądów i napięć w układach zasilających napędy tyrystorowe maszyn papierniczych MP-2 w Szczecińskich Zakładach Papierniczych w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Zakładach Celulozy i Papieru w Świeciu

6.2.1. Wybór punktów pomiarów i czasu rejestracji

Pomiary właściwe poprzedzone zostały przeprowadzeniem wizji lokalnej w obydwu badanych zakładach. W jej trakcie dokonano długotrwałych badań napięć skojarzonych na poziomie 6 kV i napięć fazowych na poziomie 0,4 kV oraz prądów przewodowych na poziomie 6 kV i prądów fazowych na poziomie 0,4 kV. Te wstępne pomiary wykonano przy użyciu woltomierza elektronicznego Brüel-Kjaer typ 2425. Obserwacje wykazały, że praca napędów elektrycznych badanych maszyn papierniczych charakteryzuje się długotrwałymi okresami - rzędu kilkudziesięciu minut - ustalonej pracy. Okresy, stanowiące zdecydowaną część całego czasu pracy badanych maszyn papierniczych, w których przebiegi napięć i prądów są quasiustalone, można traktować jako charak-

terystyczne z punktu widzenia odkształcenia napięć i prądów [2,10]. Ekstremalne odkształcenia prądu i napięcia występują poza tymi okresami czasu (rozruchy, hamowanie, awarie) i jako trwające stosunkowo krótko potraktowane zostały jako niecharakterystyczne dla pracy badanych maszyn papierniczych. Obserwacje nie wykazały istotnych różnic między przebiegami napięć w poszczególnych fazach, zarówno co do wartości, jak i kształtów. Natomiast przebiegi napięć na poziomach 0,4 kV i 6 kV różniły się znacznie.

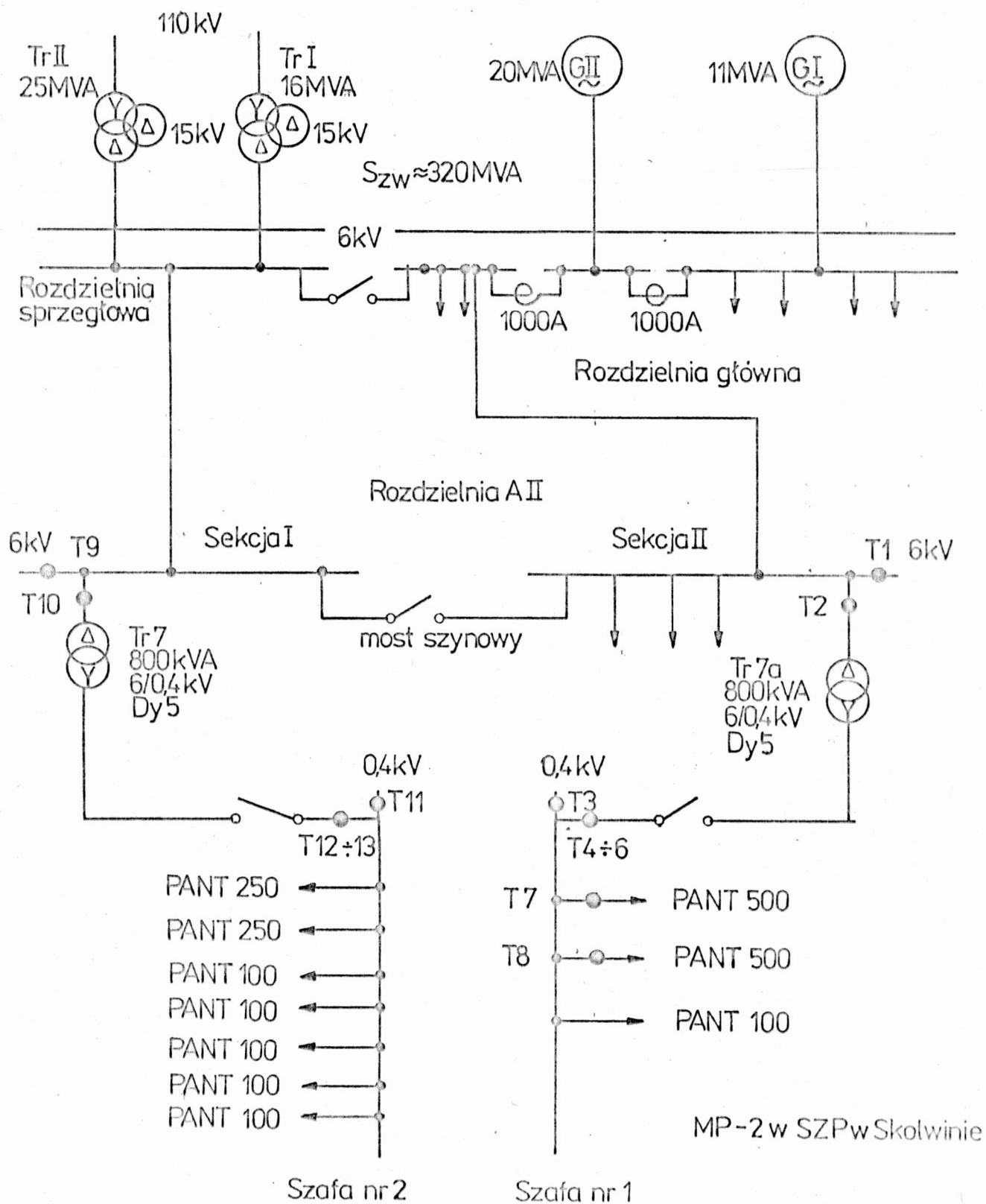
W przebiegach prądów fazowych zasilających napędy badanych maszyn papierniczych zaobserwowano występowanie trwałej niesymetrii kolejnych pulsów w obrębie jednego okresu przebiegu prądu, co powodowało istotne różnice kształtów i wartości prądów w poszczególnych fazach. Opierając się na powyższych danych czas rejestracji przebiegów poszczególnych prądów i napięć przyjęto 300 sek jako wystarczający. Wyjątek stanowi tu czas rejestracji prądów i napięć zasilających napęd główny krajarki MP-IV, ograniczony do czasu trwania jej pracy, tj. do 150 sek.

Przeprowadzone obserwacje i pomiary wstępne oraz raporty dzienne nastawni stanowiły podstawę dla wyboru punktów pomiaru. Wybrano następujące punkty, w których dokonano pomiaru i rejestracji prądów i napięć:

- w SZP w Skolwinie (rys. 6.1)

Maszyna papiernicza MP-2

- a) napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach transformatora nr 7a po stronie 6 kV,
- b) prąd przewodowy i_R transformatora nr 7a po stronie 6 kV,
- c) napięcie fazowe u_{RO} (względem sztucznego zera) na zaciskach transformatora nr 7a po stronie 0,4 kV,
- d) prąd fazowy i_R transformatora nr 7a po stronie 0,4 kV,
- e) prąd fazowy i_S transformatora nr 7a po stronie 0,4 kV,
- f) prąd fazowy i_T transformatora nr 7a po stronie 0,4 kV,
- g) prąd fazowy i_R zasilania przekształtnika PANT 1-500/1 napędu sita,
- h) prąd fazowy i_R zasilania przekształtnika PANT 1-500/1 napędów I i II prasy,



Rys.6.1. Schemat ideowy zasilania Rozdzielni AII, zasilającej maszynę papierniczą MP2; ● - punkty, w których dokonano pomiaru i rejestracji napięć i prądów

- i) napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach transformatora nr 7 po stronie 6 kV,
- j) prąd przewodowy i_R transformatora nr 7 po stronie 6 kV,
- k) napięcie fazowe u_{RO} (względem sztucznego zera) na zaciskach transformatora nr 7 po stronie 0,4 kV,
- l) prąd fazowy i_R transformatora nr 7 po stronie 0,4 kV,
- m) prąd fazowy i_S transformatora nr 7 po stronie 0,4 kV.
- w ZCiP w Świeciu (rys. 6.2):

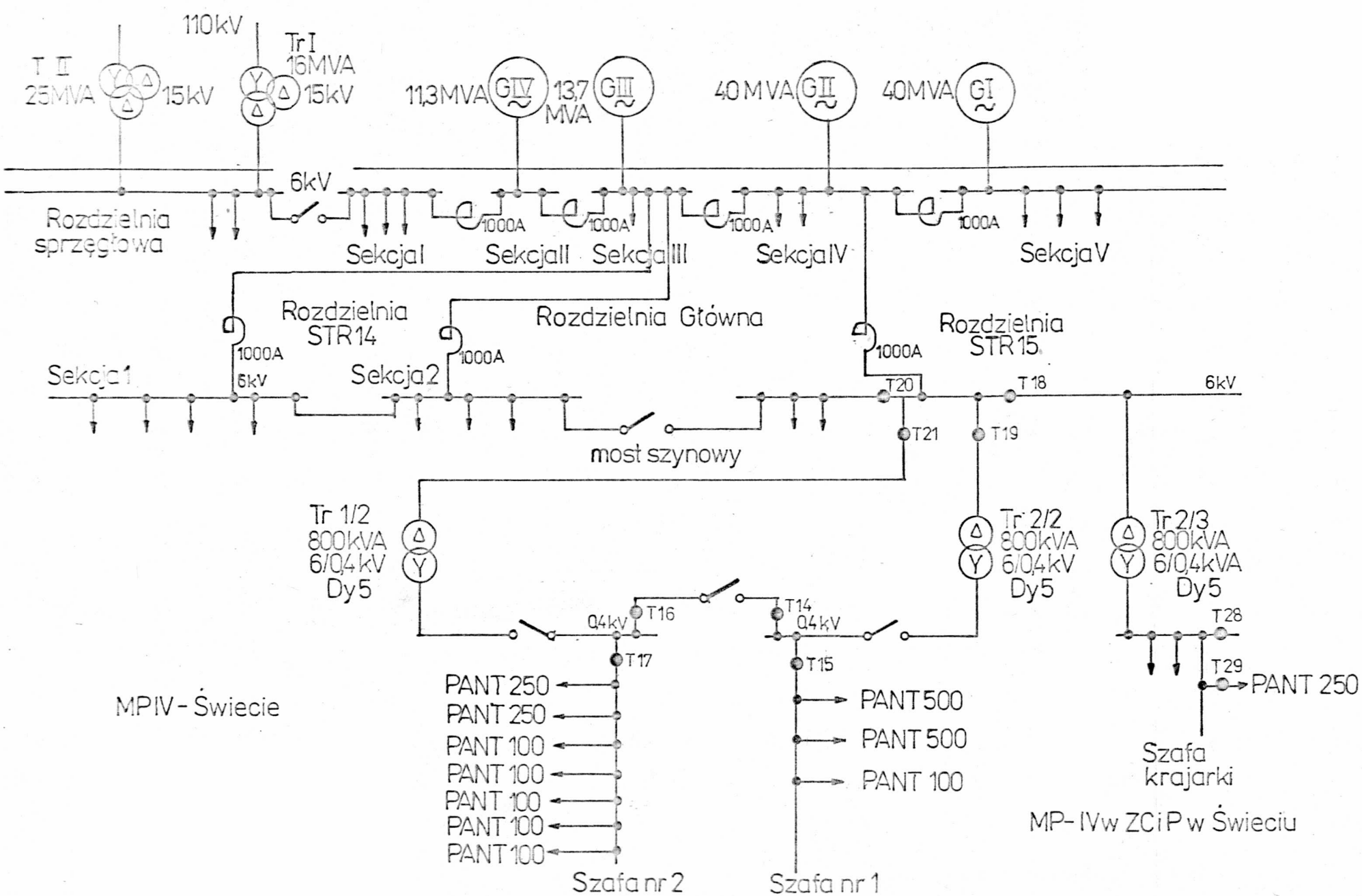
Maszyna papiernicza MP-IV

- a) napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach transformatora nr T1/2 po stronie 6 kV,
- b) prąd przewodowy i_R transformatora nr T1/2 po stronie 6 kV,
- c) napięcie fazowe u_{SO} (względem sztucznego zera) na zaciskach transformatora T1/2 po stronie 0,4 kV,
- d) prąd fazowy i_S transformatora nr T1/2 po stronie 0,4 kV,
- e) napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach transformatora nr T2/2 po stronie 6 kV,
- f) prąd przewodowy i_R transformatora nr T2/2 po stronie 6 kV,
- g) napięcie fazowe u_{SO} (względem sztucznego zera) na zaciskach transformatora T2/2 po stronie 0,4 kV,
- h) prąd fazowy i_S transformatora nr T2/2 po stronie 0,4 kV,
- i) napięcie fazowe u_{SO} (względem sztucznego zera) na zaciskach transformatora nr T2/3 po stronie 0,4 kV,
- j) prąd fazowy i_S transformatora nr T2/3 po stronie 0,4 kV,

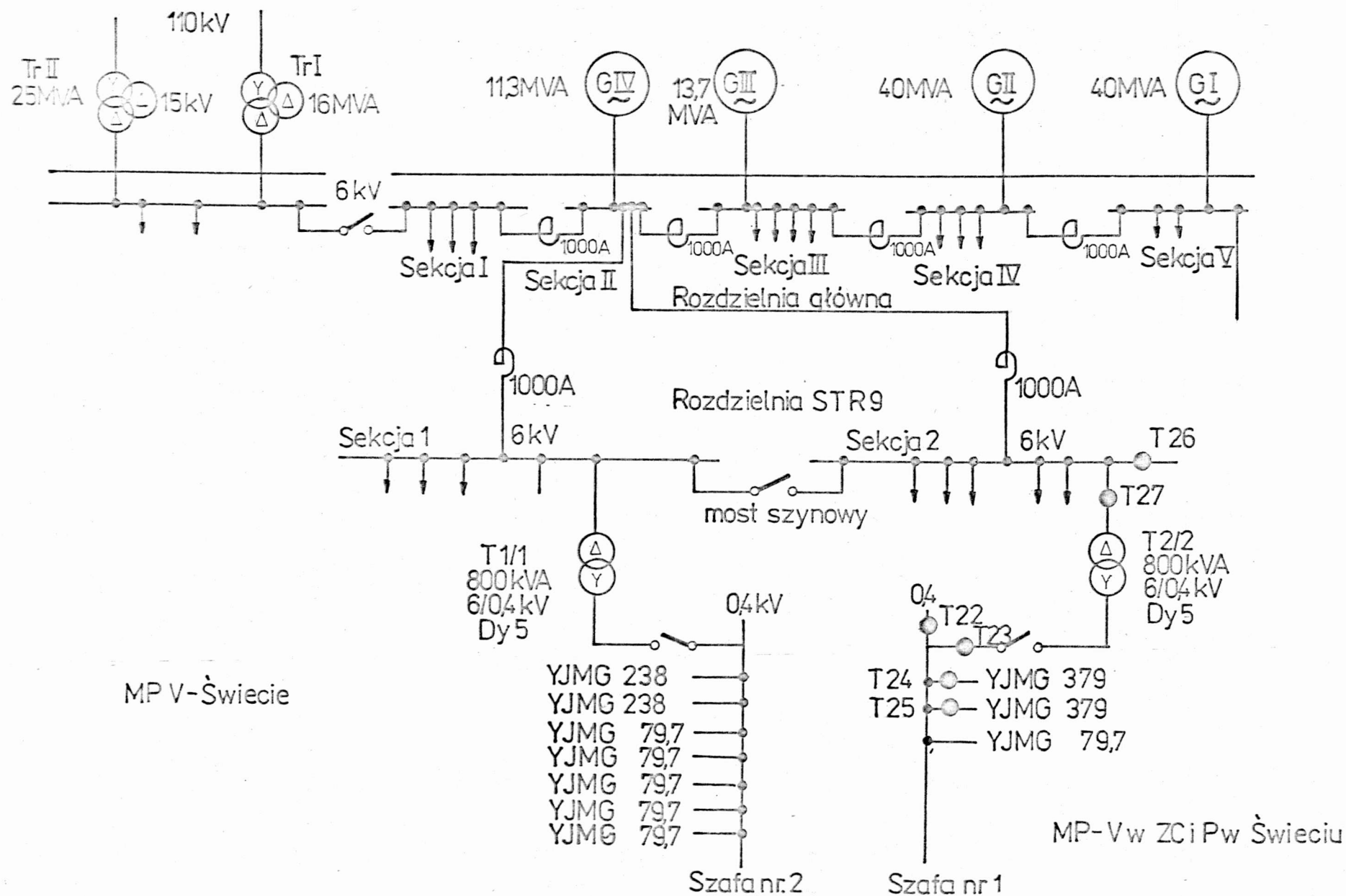
Maszyna papiernicza MP-V

- a) napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach transformatora nr T2/2 po stronie 6 kV,
- b) prąd przewodowy i_R transformatora nr T2/2 po stronie 6 kV,
- c) napięcie fazowe u_{TO} (względem sztucznego zera) na zaciskach transformatora nr T2/2 po stronie 0,4 kV,
- d) prąd fazowy i_T transformatora nr T2/2 po stronie 0,4 kV,
- e) prąd fazowy i_T zasilania YJMG 379 napędu sita,
- f) prąd fazowy i_T zasilania YJMG 379 napędu pras.

Opis badanych obiektów wraz z wartościami mocy zwarciovych na poszczególnych poziomach napięć zamieszczono w załączniku niniejszej pracy. Schematy ideowe napędów tyrystorowych typu PANT i TYRAK oraz lokalizację punktów pomiarowych zamieszczono również w załączniku.



Rys.6.2. Schemat ideowy zasilania rozdzielni STR 14 i STR 15 zasilającej maszynę papierniczą MP-IV; • - punkty, w których dokonano pomiaru i rejestracji prądów i napięć



Rys. 6.3. Schemat ideowy zasilania rozdzielni STR 9 zasilającej maszynę papierniczą MP-V;
 • - punkty, w których dokonano pomiaru i rejestracji prądów i napięć

6.2.2. Metodyka badań odkształceń napięcia i prądu zasilającego sześciopulsowe prostowniki mostkowe

Prostowniki tyrystorowe pobierają z sieci zasilającej znacznie odkształcony prąd. Kształt napięcia zasilającego również odbiega od sinusoidalnego. Badanie przebiegów o takim charakterze polega na wykonaniu ich analizy harmonicznej. Widmo częstotliwościowe jest jedną z najpełniejszych charakterystyk przebiegów czasowych, dającą dokładną informację o ich kształcie. Nie stanowi jednak syntetycznego, łatwego w posługiwaniu się wskaźnika odkształcenia przebiegu. Stąd też w elektrotechnice stosowane są, wspomniane wcześniej, współczynniki:

- odkształcenia napięcia

$$\gamma = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

- odkształcenia prądu

$$\lambda = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

W celu zapewnienia pełnej analizy harmonicznej badanych przebiegów zaproponowano układ pomiarowy, którego schemat blokowy został przedstawiony na rysunku 6.4.

Badania odkształceń napięć i prądów zasilających rozpatrywane napędy maszyn papierniczych przebiegały w dwóch etapach:

- rejestracja wybranych przebiegów prądów i napięć (w terenie),
- analiza laboratoryjna uzyskanych w terenie danych.

Na rysunku 6.4 zaznaczono część układu pomiarowego realizowaną na terenie Zakładów Papierniczych oraz w laboratorium w Uczelni. Układ powyższy pozwala na uzyskanie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych oraz obwiedni przebiegów widma częstotliwościowego zarejestrowanych sygnałów.

W tym celu zastosowano oscylograficzny, cyfrowo-pamięciowy, wąskopasmowy, wielokanałowy analizator częstotliwości firmy Brüel-Kjaer typ 3348. Do zapisu widm amplitudowo-częstotliwościowych na firmowych taśmach papierowych użyto rejestratora poziomego firmy Brüel-Kjaer typ 2307, współpracującego z analizatorem typ 3348. W celu uzyskania informacji o charakterze przebiegów czasowych składowych wąskopasmowych widma częstotliwościowego tzw. obwiedni przebiegów, dokonano dyskretyzacji widma częstotliwości w dziedzinie częstotliwości. Polegało to na tym, że napięciowe i prądowe sygnały wąskopasmowe, obejmujące zakresem częstotliwościowym poszczególne harmoniczne, poddano filtracji przy użyciu heterodynowego filtra współbieżnego firmy Brüel-Kjaer typ 2021. Po filtracji sygnały poddano wzmocnieniu przy pomocy wzmacniacza pomiarowego firmy B-K typ 2607. Tak przetworzone sygnały zarejestrowano wykorzystując w tym celu wymieniony wcześniej rejestrator poziomego B-K typ 2307. Uzyskane w ten sposób rejestrogramy obwiedni poszczególnych harmonicznych analizowanych przebiegów były kalibrowane i skalowane w wartościach skutecznych. Powyższa metoda rejestracji, przechowywania oraz analizy danych charakteryzuje się dużą dokładnością oraz odpornością na zakłócenia zarówno w trakcie pomiarów w terenie, jak i w trakcie analizy laboratoryjnej, pozwala na wykonanie wszechstronnych badań w obwodach zasilania prostowników tyrystorowych. Wymaga ona jednak wymienionej wyżej unikalnej aparatury. Parametry użytych przyrządów pomiarowych podano w załączniku.

6.3. Analiza laboratoryjna wykonanych w terenie pomiarów

Zarejestrowane w trakcie pomiarów w terenie sygnały prądowe i napięciowe poddano lustracji za pomocą oscyloskopu elektronicznego z wkładką czterostrumieniową OS-150-4 (rys. 6.4), przy 10-krotnej ekspansji skali czasu (przez zmniejszenie prędkości przesuwu taśmy magnetycznej z 38,1 cm/s do 3,81 cm/s). Umożliwiło to równoczesne porównywanie ich we wszystkich kanałach oraz ocenę koincydencji charakterystycznych cech przebiegów. W celu utrwalenia informacji o kształtach przebiegów czasowych analizowanych sygnałów dokonano zapisu wybranych, możliwie typowych ich fragmentów na rejestracyjnych taśmach papierowych.

Zarejestrowane w ten sposób sygnały prądowe i napięciowe przedstawiono w załączniku:

- dla MP-2 w Skolwinie w tablicach nr T1a do T13a,
- dla MP-IV w Świeciu w tablicach nr T14a do T21a,
- dla MP-V w Świeciu w tablicach nr T22a do T27a,
- dla krajarki zwojów MP-IV w Świeciu w tablicach nr T28a i T29a.

Następnie przeprowadzono analizę częstotliwościową zarejestrowanych przebiegów. Analizy dokonano wykorzystując fragment układu pokazanego na rys. 6.4. Zastosowano w tym celu wymieniony wcześniej analizator częstotliwości BK typ 3348. Zastosowanie powyższego analizatora umożliwiło analizę "płynących" widm częstotliwości przebiegów napięć i prądów zarówno w dziedzinie czasu, jak i w dziedzinie częstotliwości. W trakcie wstępnej analizy obserwowano nieuśrednione widma częstotliwościowe przebiegów, aktualizowane co 45 ms, w różnych zakresach częstotliwości, oraz, wykorzystując dwa układy pamięci, porównywano widma poszczególnych przebiegów między sobą w analogicznych momentach czasu lub widma tego samego przebiegu w różnych momentach czasu. Na tej podstawie wybrano parametry układu do dalszej, szczegółowej analizy, takie jak: zakresy zmian częstotliwości, rodzaj i czas uśredniania widma przebiegu, rodzaj korekcji itp. Ze względu na stosunkowo długie odcinki czasowe, w których analizowane przebiegi miały charakter quasiustalony, wyznaczono widma amplitudowo-częstotliwościowe tych przebiegów w czasie uśredniania $T_u=115$ s (dla maszyny papierniczej MP-2 Skolwin). Przyjęto następujące zakresy zmian częstotliwości widm amplitudowo-częstotliwościowych:

- dla przebiegów napięć po stronie 6 kV: 0-500 Hz,
- dla przebiegów napięć po stronie 0,4 kV: 0-5000 Hz,
- dla przebiegów prądów po stronie 6 kV i 0,4 kV: 0-2000 Hz.

Przy dynamice 50 dB - której odpowiada poziom zerowy równy 0,3% amplitudy maksymalnej składowej widma - widma analizowanych przebiegów mieściły się w w/w zakresach.

Widma te przedstawiono w załączniku:

- dla MP-2 w Skolwinie w tablicach nr T1c do T13c,
- dla MP-IV w Świeciu w tablicach nr T14b do T21b,
- dla MP-V w Świeciu w tablicach nr T22b do T27b,
- dla krajarki zwojów MP-IV w Świeciu w tablicach nr T28b i T29b.

W celu ukazania zakresu fluktuacji widm częstotliwości analizowanych przebiegów uśrednionych w czasie 115 s przedstawiono widma częstotliwościowe o czasie uśredniania 40 ms, najbardziej od nich (115 s) odbiegające. Jako kryterium maksymalnej rozbieżności przyjęto największą różnicę w wartościach współczynników odkształcenia napięcia γ lub prądu λ wyznaczonych przy pomocy pomiarów. Widma te przedstawiono w załączniku:

- dla MP-2 w Skolwinie w tablicach nr T1b do T13b,
- dla MP-IV w Świeciu w tablicy nr T22c,
- dla krajarki zwojów MP-IV w Świeciu w tablicach nr T28c i T29c.

W celu określenia charakteru przebiegów czasowych poszczególnych harmonicznym prądu zasilającego napęd tyrystorowy krajarki zwojów MP-IV w Świeciu, sygnały prądowe poddano filtracji. Zastosowano w tym celu wymieniony wcześniej filtr BK typ 2021. Do analizy przyjęto szerokość pasma przepustowego filtra $B_T = 31,6$ Hz, co wynikało z szerokości wstęg bocznych widma częstotliwościowego przebiegów modulowanych amplitudowo oraz z odstępu między kolejnymi harmonicznymi przebiegu. Częstotliwość środkowa filtra f_0 odpowiadała częstotliwości analizowanej harmonicznej. Jak nadmieniono wyżej uzyskiwany dzięki filtracji sygnał wąskopasmowy był wzmacniany i podawany do wejścia rejestratora BK 2307, w którym za pomocą demodulacji szczytowej (obwiedniowej) przetwarzany był na sygnał proporcjonalny do przebiegu obwiedni analizowanej harmonicznej. Zarejestrowane w ten sposób przebiegi poszczególnych harmonicznym prądu przedstawiono w załączniku w tablicach nr T30 do Z34. Na tym zakończono badania przemysłowe napędów tyrystorowych maszyn papierniczych.

Reasumując, można stwierdzić, że przeprowadzono pełne badania wyższych harmonicznym wprowadzanych do sieci zasilającej przez napędy tyrystorowe maszyn papierniczych. Badano napędy krajowe i zagraniczne kilku maszyn papierniczych, na różnych poziomach napięć w dwóch zakładach. Zaproponowany układ pomiarowy pozwala na wykonanie pełnej analizy harmonicznej przy zachowaniu wystarczającej dokładności.

7. ANALIZA WYNIKÓW OTRZYMANYCH W CZASIE POMIARÓW

7.1. Warunki pracy tyrystorowych napędów maszyn papierniczych typu PANT i YJMG - TYRAK z uwagi na odkształcenia prądu i napięcia zasilającego

Jak wcześniej wspomniano układy PANT produkowane przez FTiAT "ELTA" w Łodzi, jak i układy YJMG-TYRAK produkowane przez szwedzką firmę ASEA są trójfazowymi, sześciopulsowymi, pełnosterownymi, prostownikami mostkowymi wyposażonymi w przełącznik zmiany kierunku wirowania, co umożliwia pracę nawrotną silnika prądu stałego. Układy takie charakteryzują się szerokim zakresem regulacji napięcia wyjściowego tak przy pracy prostownikowej, jak i falownikowej oraz szerokim zakresem regulacji prądu wyjściowego dla przewodzenia ciągłego i przerywanego. Warunki pracy takiego układu, a co za tym idzie i kształt impulsów prądowych zależą jak wiadomo od charakteru i parametrów obwodu obciążenia, rodzaju i jakości sterowania, parametrów układu zasilającego oraz zjawisk komutacyjnych. Pomijając te ostatnie kształt impulsu prądowego w układzie prostownikowym odpowiada następującej zależności [3,6]:

$$i(x) = \frac{U_{1m}}{R} [\cos \psi \sin(x-\psi) - \epsilon] + \left\{ \frac{U_{1m}}{R} [\epsilon - \cos \psi \sin(\vartheta_z - \psi)] + i_0 \right\} \cdot \exp[-(x - \vartheta_z) \operatorname{ctg} \psi] \quad (7.1)$$

gdzie: ψ - kąt obciążenia prostownika,

ϵ - względna wartość siły elektromotorycznej SEM w obwodzie obciążenia prostownika,

ϑ_z - kąt opóźnienia zapłonu prostownika,

ϑ_w - kąt wyłączenia prostownika,

i_0 - wartość początkowa prądu prostownika w chwili $t=0$.

Z zależności tej wynika, że praca prostownika, charakteryzująca się ciągłością i stałością przebiegu prądu obciążenia, ma miejsce jedynie wówczas, gdy wypadkowa wartość indukcyjności obwodu obciążenia i układu zasilającego zmierza do nieskończoności. Wówczas wartość elektromagnetyczna stałej czasowej tak pomyślanego obwodu obciążenia równa

$$T_{em} = \frac{\omega L_d}{R}$$

również zmierza do nieskończoności, a co za tym idzie $\psi = 0$ i $i(x) = i_0$.

Praktycznie przypadek taki realizuje się umieszczając w obwodzie obciążenia prostownika dławik wygładzający o dużej indukcyjności.

W napędach tyrystorowych maszyn papierniczych wymagana jest duża dynamika układu, w celu przeciwdziałania zerwaniu wstęgi papieru przy zmianach obciążenia. W związku z tym, aby maksymalnie zmniejszyć elektromagnetyczną stałą czasową układu T_{em} nie stosuje się dławików wygładzających w przekształtnikach typu PANT i YJMG-TYRAK. Często spotykanym zjawiskiem w tyrystorowych napędach maszyn papierniczych jest niesymetria konstrukcyjna poszczególnych gałęzi prostownika oraz niesymetria obciążenia trójfazowego układu zasilającego. Czynniki powyższe uwiadcniają się zwykle w przebiegach czasowych prądów fazowych w postaci niepowtarzalności kształtów impulsów w obrębie jednego okresu przebiegu i w różnicach pomiędzy przebiegami czasowymi prądów różnych faz.

Takie powiększenie odkształcenia przebiegów ma odbicie w widmach amplitudowo-częstotliwościowych w postaci pojawienia się harmoniczných niecharakterystycznych: parzystych, wielokrotności trzech, jak i ułamkowych oraz zmiany wielkości amplitud harmoniczných charakterystycznych.

Fluktuacje obciążenia tyrystorowych napędów papierniczych przy niezmiennym kącie sterowania α mogą być traktowane jako modulacja amplitudowa o charakterze stochastycznym, w której przebiegiem modulowanym jest okresowy przebieg odkształcony. Zjawisko to w widmie amplitudowo-częstotliwościowym uwiadcza się w postaci ciągłych wstęg bocznych*) wokół prążków reprezentujących poszczególne harmoniczne odkształconego, okresowego przebiegu modulowanego.

*) Zjawisko powstawania wstęg bocznych w trakcie analizy częstotliwościowej towarzyszy również procesowi uśredniania analizowanego przebiegu, inaczej mówiąc jest wynikiem nałożenia przebiegu prostokątnego na przebieg analizowany.

Omówione cechy są typowe dla pracy napędów tyrystorowych maszyn papierniczych typu PANT i YJMG-TYRAK z punktu widzenia oddziaływania tych napędów na sieć zasilającą.

Wydaje się, że są one typowe dla całej klasy napędów tyrystorowych pracujących przy zmianach obciążenia rzędu 30% do 50% i nieznacznej indukcyjności w obwodzie prądu stałego.

7.2. Analiza przebiegów prądów zasilających napędy tyrystorowe typu PANT oraz YJMG-TYRAK

7.2.1. Współczynniki odkształcenia przebiegów napięcia i prądu napędów badanych maszyn papierniczych

Jak wcześniej wspomniano w technice napędu elektrycznego do oceny jakości energii elektrycznej stosuje się tak, jak w elektrotechnice współczynniki odkształcenia prądu λ i napięcia γ . Współczynniki γ i λ dla analizowanych przebiegów zostały wyznaczone rachunkowo na podstawie ich widm uśrednionych. Obliczone wartości przedstawiono w tabelach 7.1 do 7.3. W obliczeniach nie uwzględniono składowych widma o amplitudach mniejszych od wartości 0,3%. Dodatkowy uchyb powstaje w wyniku nieuwzględnienia ciągłości widma w pewnych zakresach częstotliwości. W związku z tym jednak, że w zależnościach opisujących współczynnik odkształcenia napięcia i prądu występuje sumowanie geometryczne wartości skutecznych, ewentualne błędy spowodowane w/w czynnikami są pomijalnie małe. W celu zweryfikowania wyników uzyskanych obliczeniowo przeprowadzono pomiary stopnia odkształcenia przebiegów napięć i prądów za pomocą automatycznego miernika zniekształceń nieliniowych typu PMZ-9, produkowanego przez Zakład Opracowań i Produkcji Aparatury Naukowej "KABID-ZOPAN". Należy jednak podkreślić, że przy pomiarze zniekształceń przy pomocy miernika PMZ-9 dużą rolę odgrywa stabilność amplitudy badanego przebiegu. Fluktuacje amplitudy mają bowiem bezpośredni wpływ na błąd pomiaru, szczególnie przy pomiarach przebiegów nieznacznie odkształconych, dlatego że w trakcie pomiaru następuje odejmowanie wartości skutecznych niewiele różniących się od siebie.

T a b e l a 7.1.

Wartości współczynników odkształcenia napięcia γ i prądu λ badanych przebiegów napięć i prądów zasilających. Maszyn papiernicza MP-2 w Skolwinie

Numer tablicy wg załącznika	Miejsce przeprowadzenia pomiaru	Wartość skuteczna napięcia lub prądu	Wsp. odkształcenia napięcia lub prądu		Względna wartość w h o największym udziale w przebiegu rząd - wartość
			obliczony	zmierzony	
T 1	URS 6 kV transformator nr 7	6.000 kV	3,6%	5%	2 - 3,2%
T 9	URS 6 kV transformator nr 7	6.100 kV	3,1%	4,8%	2 - 3,0%
T 3	URO 0,4 kV transformator nr 7a	217 V	8,1%	10%	5 - 6,5% 2 - 3,0%
T11	URO 0,4 kV transformator nr 7	224 V	8,2%	10%	2 - 6,1% 5 - 5,1%
T 2	i _R strona 6 kV transformator nr 7a	46,6 A	34,5%	35%	5 - 31% 3 - 9%
T10	i _R strona 6 kV transformator nr 7	38 A	29,6%	33%	5 - 28% 3 - 8%
T 4	i _R strona 0,4 kV transformator nr 7a	725 A	37,6%	36%	5 - 32% 3 - 17,5%
T 5	i _S strona 0,4 kV transformator nr 7a	700 A	25,1%	28%	5 - 22% 3 - 10%
T 6	i _T strona 0,4 kV transformator nr 7a	600 A	35,1%	38,5%	5 - 31% 7 - 9%
T12	i _R strona 0,4 kV transformator nr 7	540 A	28,7%	35%	5 - 26% 2 - 10%
T13	i _S strona 0,4 kV transformator nr 7	500 A	32,8%	36%	5 - 31% 2 - 8,2%
T 7	i _R strona 0,4 kV PANT 500 - sita	200 A	36,9%	42%	5 - 34% 11 - 8,5%
T 8	i _R strona 0,4 kV PANT 500 - prasy	160 A	61,9%	66%	5 - 45% 7 - 28% 3 - 22%

T a b e l a 7.2.

Wartości współczynników odkształcenia napięcia γ i prądu λ badanych przebiegów napięcia i prądu zasilającego. Maszyna papiernicza MP-IV w Świeciu

Numer tablicy wg załącznika	Miejsce przeprowadzenia pomiaru	Wartość skuteczna napięcia lub prądu	Współczynnik odkształcenia napięcia lub prądu	Względna wartość w h o największym udziale w przebiegu rząd - wartość
T 14	U_{SO} 0,4 kV transformator nr Tr 2/2	215 V	12,2%	5 - 10% 11 - 4%
T 16	U_{SO} 0,4 kV transformator nr Tr 1/2	215 V	7,0%	5 - 6,3%
T 28	U_{SO} 0,4 kV transformator nr Tr 2/3	215 V	8,7%	11 - 6% 13 - 4,5%
T 18	U_{RS} 6 kV transformator nr Tr 2/2	5800 V	1,7%	5 - 1,6%
T 20	U_{RS} 6 kV transformator nr Tr 1/2	5800 V	1,6%	5 - 1,5%
T 15	i_S 0,4 kV transformator nr Tr 2/2	755 A	38,1%	5 - 36% 11 - 8%
T 17	i_S strona 0,4 kV transformator nr Tr 1/2	420 A	40,0%	5 - 38% 7 - 9,5%
T 29	i_S strona 0,4 kV transformator nr Tr 2/3	270 A	30,1%	5 - 28% 11 - 8,8%
T 19	i_R strona 6 kV transformator nr Tr 2/2	25 A	32,5%	5 - 31% 11 - 6,2%
T 21	i_R strona 6 kV transformator nr Tr 1/2	9 A	49,3%	5 - 45% 7 - 14,5%

Ponieważ analizowane przebiegi nie były w pełni ustalone, a w przypadku napięć były również niewiele odkształcone, należy przypuszczać, że wynik pomiaru był obarczony stosunkowo dużym błędem, co tłumaczy rozbieżności pomiędzy wartościami współczynników γ i λ uzyskanymi na drodze obliczeniowej i pomiarowej. Bardziej wiarygodne w tym przypadku są wartości wyliczone na podstawie uzyskanych w czasie analizy widm amplitudowo-częstotliwościowych

T a b e l a 7.3.

Wartość współczynników odkształcenia napięcia i prądu badanych przebiegów napięcia i prądu zasilającego. Maszyna papiernicza MP-IV w Świeciu

Numer tablicy wg załącznika	Miejsce przeprowadzenia pomiaru	Wartość skuteczna napięcia lub prądu	Współczynnik odkształcenia napięcia γ lub prądu λ	Względna wartość w h o największym udziale w przebiegu rząd - wartość
T 22	U_{TO} 0,4 kV transformator nr Tr 2/2	208 V	12,3%	5 - 9,5% 11 - 4,8%
T 26	U_{RS} 6 kV transformator nr Tr 2/2	5900 V	1,1%	5 - 1,1%
T 23	i_T 0,4 kV transformator nr Tr 2/2	980 A	30,0%	5 - 28% 11 - 7,8%
T 24	i_T strona YJMG 379 - prasy 0,4 kV	470 A	30,1%	5 - 28% 11 - 8%
T 25	i_T strona YJMG 379 - sita 0,4 kV	530 A	34,2%	5 - 32% 11 - 8%
T 27	i_R strona transformator nr Tr 2/2 6 kV	63 A	31,4%	5 - 30% 11 - 7%

badanych przebiegów. W tabelach 7.1 do 7.3 podano również wartości harmoniczných napięcia i prądu o największym udziale w widmie przebiegu.

Na podstawie tabel 7.1 do 7,3 można stwierdzić, że papiernicze napędy tyrystorowe znacznie pogarszają jakość energii elektrycznej w punkcie ich przyłączenia do sieci zasilającej. Współczynniki odkształcenia prądu γ i napięcia λ osiągają wartości duże, lecz spotykane w tego typu układach. Wielkości przedstawione w tabelach są komentowane w następnych rozdziałach.

7.2.2. Analiza przebiegów prądów zasilających indywidualne napędy tyrystorowe największych mocy typu PANT i TYRAK

Analiza przebiegów prądów fazowych pojedynczych układów przekształtników PANT 1-500/1 o największych mocach znamionowych spośród wszystkich układów zasilających napędy elektryczne maszyn papierniczych MP-2 w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Świeciu wykazała, że:

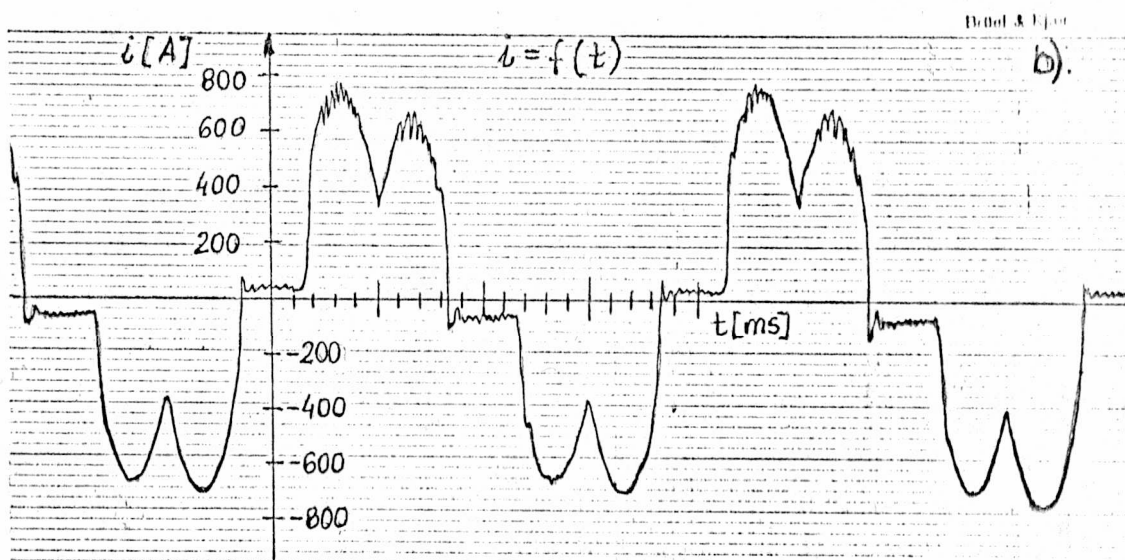
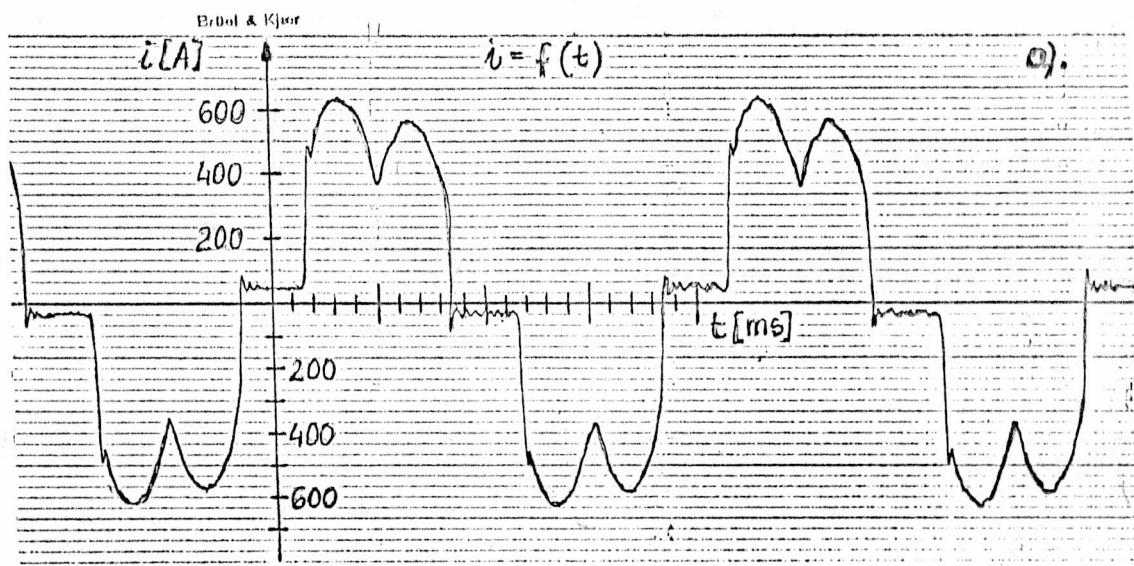
- kształty impulsów prądowych znacznie odbiegają od prostokątów, a są zbliżone do fragmentów sinusoidy, co świadczy o małej wartości elektromagnetycznej stałej czasowej obwodu obciążenia T_{em} , spowodowanej brakiem dławików wygładzających w obwodach tworników silników prądu stałego. Przykładowe przebiegi pokazano na rysunku 7.1,

- w przypadku maszyny papierniczej MP-2 Skolwin kąty wysterowania α są na tyle duże, że prąd obciążenia jest na granicy przewodzenia impulsowego, co powoduje znaczne wartości współczynników szczytu s , zjawiska tego nie obserwuje się w przypadku maszyn MP-IV i MP-V w Świeciu; odnośne przebiegi przedstawiono na rysunku 7.2,

- występują znaczne różnice dochodzące do 30% w amplitudach impulsów (czasie jednego okresu przebiegu prądu), co jest prawdopodobnie wynikiem wadliwego działania układu regulacyjno-sterującego. Wartości odchyień zebrano w tabeli 7.4, przebiegi przedstawiono na rysunku 7.1 i 7.2,

- przekształtniki są obciążone w małym, a niekiedy w bardzo małym stopniu (szczególnie maszyna MP-2 Skolwin oraz MP-IV Świecie). Obciążenie poszczególnych sekcji badanych maszyn papierniczych podano w tabeli 7.4,

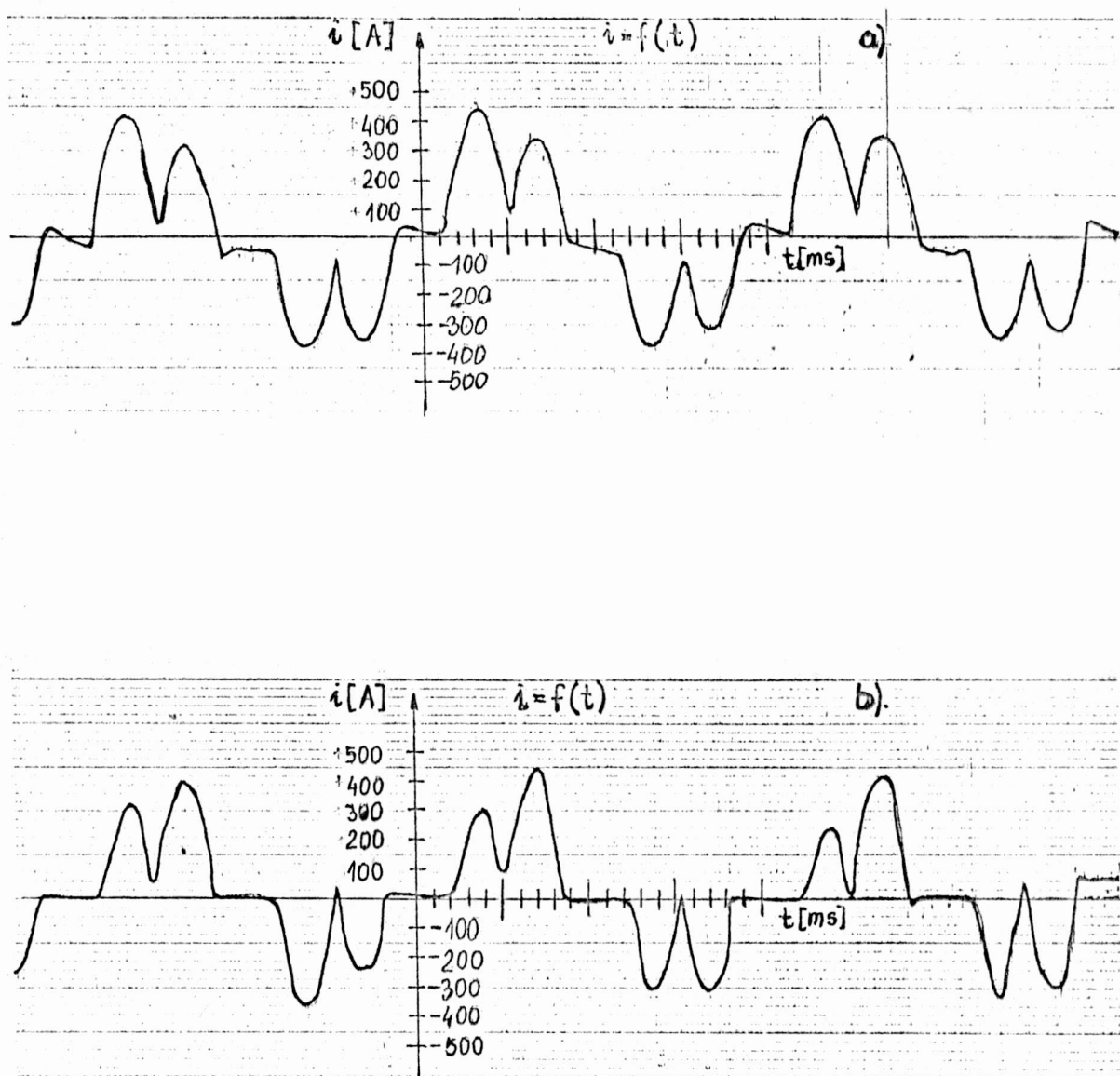
- szerokości badanych impulsów prądowych odbiegają od teoretycznej wartości $2\pi/3$ we wszystkich badanych przebiegach, również odstępy między impulsami dodatnim i ujemnym w obrębie jednego okresu odbiegają od teoretycznej wartości $\pi/3$. W tabeli 7.5 zestawiono teoretyczne oraz rzeczywiste wartości szerokości oraz odstępu impulsów prądowych pobieranych przez badane sekcje maszyn papierniczych.



OP 1102

Rys.7.1. Przebieg wartości chwilowej prądu w fazie i_T :

- a) napędu sita MP-V w Świeciu
- b) napędu prasy MP-V w Świeciu



Rys.7.2. Przebieg wartości chwilowych prądu w fazie i_R :

- a) napędu sita MP-2 w Skolwinie
- b) napędu prasy MP-2 w Skolwinie

T a b e l a 7.4.

Wartości odchylen amplitud impulsów prądowych w czasie jednego okresu oraz obciążalności badanych sekcji maszyn papierniczych

Numer tablicy wg załącznika	Maszyna papiernicza	Wielkość mierzona	Odchylenie amplitudy impulsu w obrębie jednego okresu max.	Obciążenie poszczególnych sekcji i maszyn papierniczych w procentach obciążenia znamionowego
T24	MP-IV Świecie	Prąd i_T zasilania PANT 1-500/1 napędu prasy	12%	62%
T25	MP-V Świecie	Prąd i_T zasilania PANT 1-500/1 napędu sita	14%	69%
T 7	MP-2 Skolwin	Prąd i_R zasilania PANT 1-500/1 napędu sita	19%	27,5%
T 8	MP-2 Skolwin	Prąd i_R zasilania PANT 1-500/1 napędu prasy	33%	21%

T a b e l a 7.5.

Wymagane oraz rzeczywiste wartości szerokości oraz odstępu impulsów prądowych pobieranych przez sekcje sitowe i sekcje pras maszyn papierniczych MP-2 w Skolwinie oraz PM-V w Świeciu

Numer tablicy wg załącznika	Maszyna papiernicza	Wielkość mierzona	Szerokość impulsu prądowego [rad]		Odstęp między impulsami [rad]	
			w*)	r**)	w*)	r**)
T 7	MP-2 Skolwin	Prąd i_R zasilania PANT 1-500/1 napędu sita	0,67	0,73	0,33	0,31
T 8	MP-2 Skolwin	Prąd i_R zasilania PANT 1-500/1 napędu prasy	0,67	0,61	0,33	0,39
T24	MP-V Świecie	Prąd i_T zasilania PANT 1-500/1 napędu prasy	0,67	0,71	0,33	0,31
T25	MP-V Świecie	Prąd i_T zasilania PANT 1-500/1 napędu sita	0,67	0,68	0,33	0,32

*) wymagany;

**) rzeczywisty

Powyższe czynniki znajdują swe odbicie w widmach amplitudowo-częstotliwościowych:

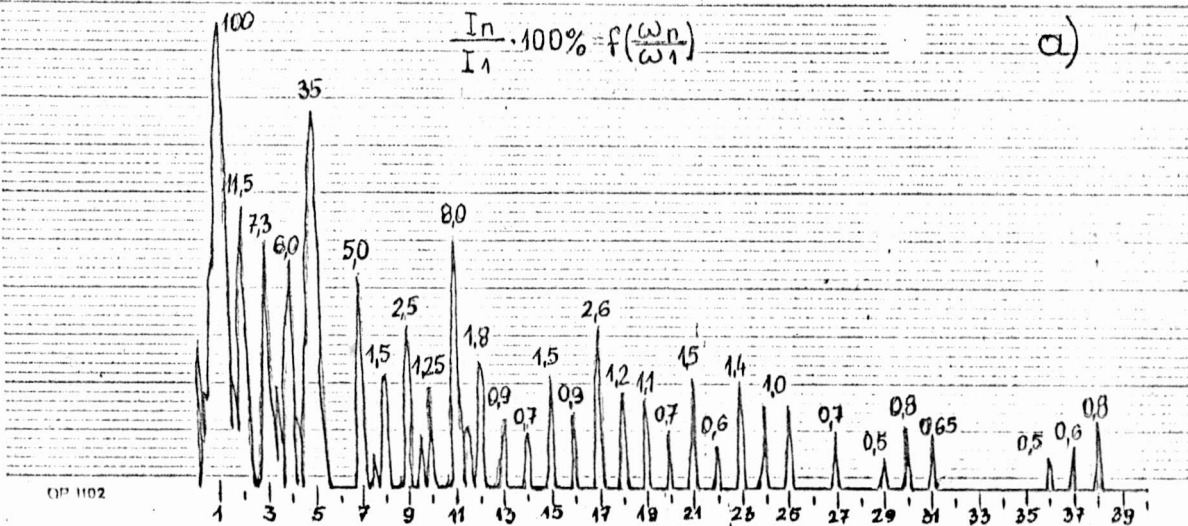
- zawartość harmoniczných charakterystycznych szczególnie niższych rzędów we wszystkich przebiegach jest mniejsza niż w widmie impulsów prostokątnych. W tabeli 7.6 zestawiono zawartości harmoniczných wytwarzanych przez tyrystorowe napędy sit oraz pras maszyn MP-2 Skolwin i MP-V Świecie, charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe omawianých przebiegów przedstawiono na rysunkach 4.5b i c oraz 7.3,

T a b e l a 7.6.

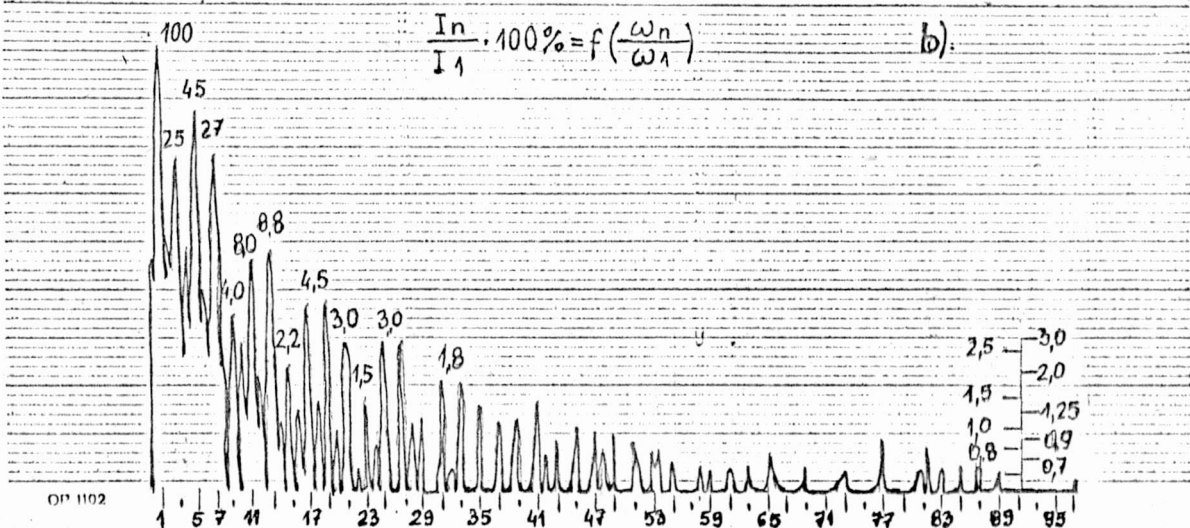
Zawartość harmoniczných wytwarzanych przez tyrystorowe napędy sit i pras maszyn MP-2 Skolwin i MP-V Świecie

Rząd harmonicznój n	Zawartość harmoniczných [%]			
	Maszyna MP-2 Skolwin		Maszyna MP-V Świecie	
	Napęd sita	Napęd pras	Napęd sita	Napęd pras
2	5,2%	14,0%	6,3%	1,6%
3	4,9%	22,0%	0,9%	1,5%
4	4,8%	11,0%	2,5%	0,0%
5	34,0%	45,0%	32,0%	28,0%
6	1,2%	2,1%	0,3%	0,3%
7	5,0%	28,0%	1,1%	4,0%
8	1,1%	0,6%	2,0%	0,7%
9	1,8%	3,2%	0,5%	0,6%
10	1,7%	3,0%	0,9%	0,0%
11	8,5%	7,2%	8,0%	8,0%
12	1,3%	1,4%	0,45%	0,0%
13	1,2%	9,0%	1,8%	3,0%
14	0,75%	0,6%	1,25%	0,5%
15	1,5%	1,4%	0,4%	0,35%
16	0,9%	1,4%	0,7%	0,35%
17	3,0%	3,2%	4,0%	4,0%
18	0,95%	1,0%	0,4%	0,0%
19	0,95%	4,4%	1,4%	2,2%
20	0,45%	0,95%	1,1%	0,45%
21	0,95%	2,4%	0,35%	0,3%
22	0,4%	0,0%	0,65%	0,35%
23	1,4%	1,25%	2,5%	2,4%
24	0,88%	0,8%	0,45%	0,0%
25	0,87%	2,1%	1,0%	2,0%

Drödel & Kjer



Drödel & Kjer



Rys.7.3. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przebiegów prądów w fazie i_R napędów: a) prasy MP-2 w Skolwinie; b) sita MP-2 w Skolwinie

- wraz ze zmniejszaniem się obciążenia wzrasta względna zawartość harmoniczných charakterystycznych, szczególnie harmoniczných niższych rzędów (tab. 7.6, rys. 4.5b i c oraz 7.3),

- w przypadku zasilania napędu prasy MP-2 "Skolwin" dla wyższych rzędów harmoniczných następuje inwersja wartości (przewodzenie na granicy przewodzenia impulsowego); harmoniczne rzędów $n=6k-1$ mają wartości amplitud mniejsze niż harmoniczne rzędów $n=6k+1$ (tab. 7.6),

odnośne przebiegi przedstawiono na rysunku 7.3,

- znaczne wartości osiągają harmoniczne rzędów $n=3k$ (tabela 7.6), co świadczy o znacznej niesymetrii fazowej układu, zawartość harmonicznych tych rzędów zwiększa się wraz ze wzrostem różnicy między wymaganą a rzeczywistą szerokością impulsu prądowego (tab. 7.5), największe wartości harmonicznych rzędów $n=3k$ obserwuje się dla impulsów krótszych od $2\pi/3$ (napęd prasy MP-2 "Skolwin", rys. 7.2 i 7.3),

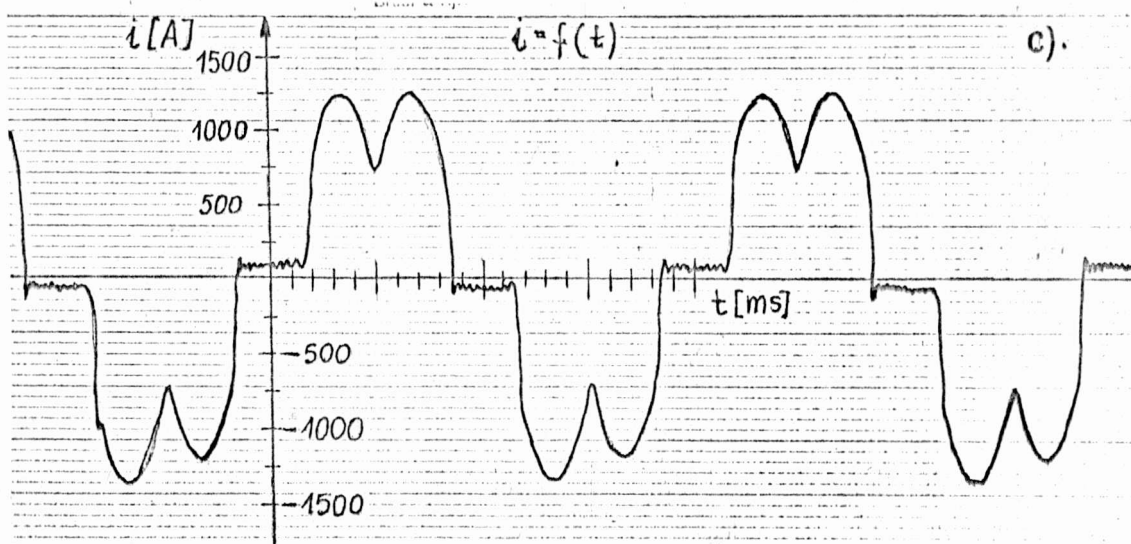
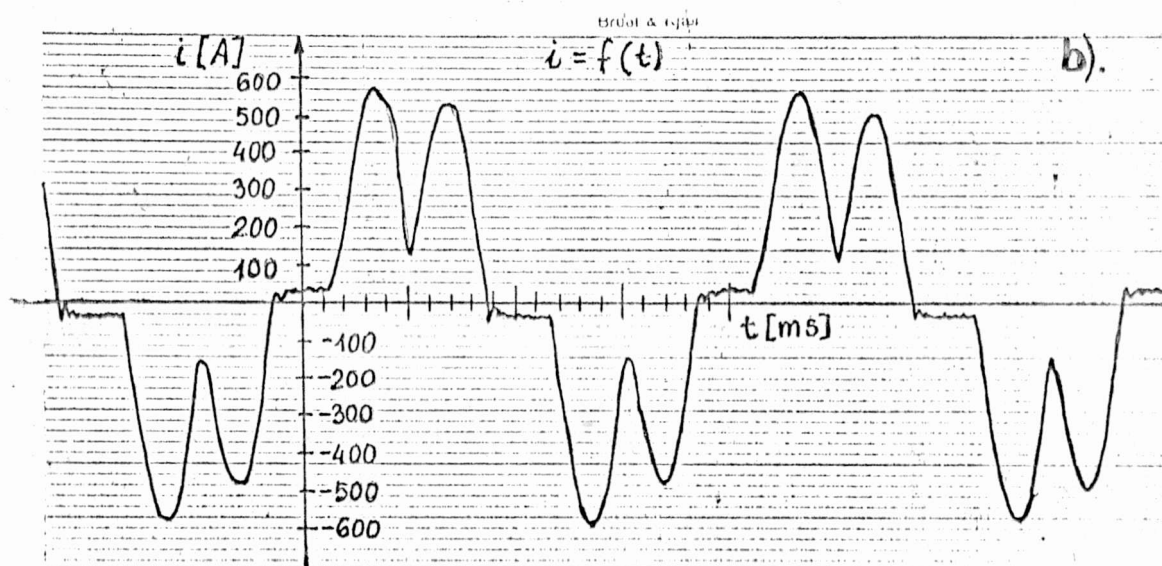
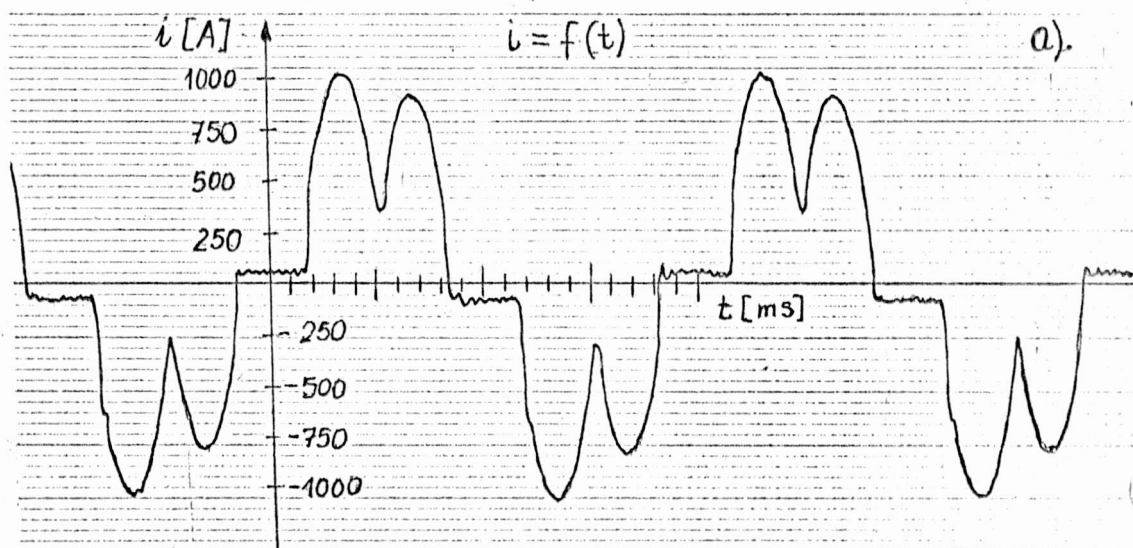
- podobnie znaczne wartości osiągają amplitudy harmonicznych rzędów $n=2k$, co wynika z faktu, iż przebieg okresowy nie spełnia warunku (rys. 4.5 i 7.3):

$$f(t + \frac{T}{2}) = -f(t).$$

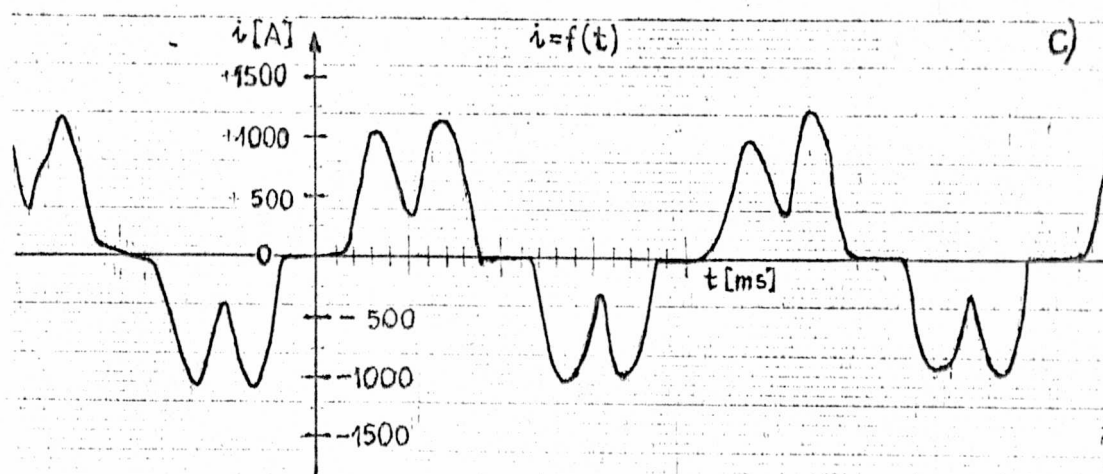
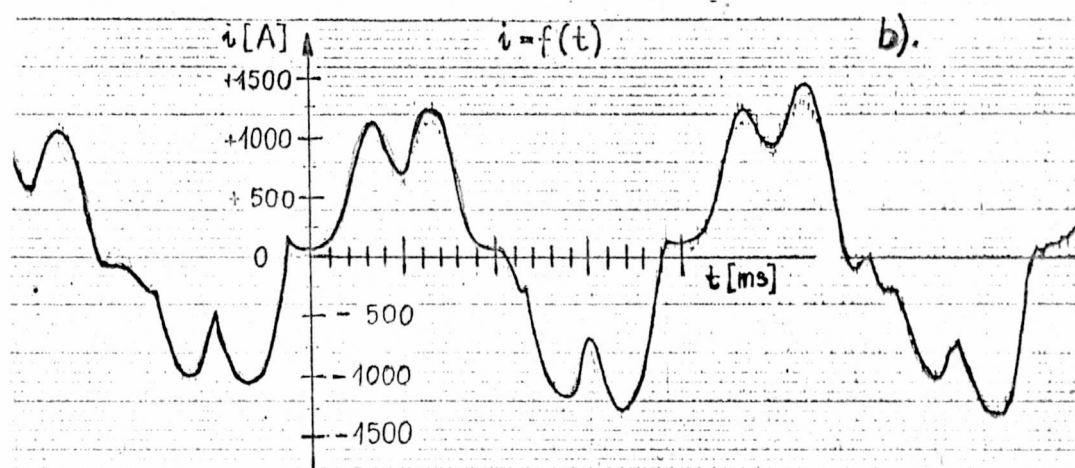
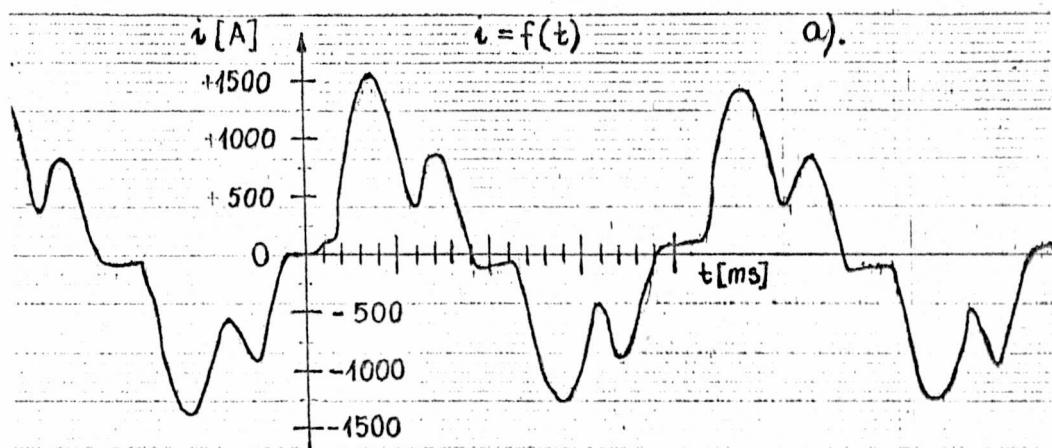
Odkształcenie przebiegów prądów jest więc duże, co znajduje również swój wyraz w dużych wartościach współczynników odkształcenia: λ obliczona dochodzi do 62%, a λ zmierzona do 66% (tab. 7.1, 7.2).

7.2.3. Analiza przebiegu prądów zasilających grupowe napędy tyrystorowe maszyn papierniczych

Znaczne odkształcenie prądów fazowych poszczególnych PANT-ów i układów YJMG-TYRAK znalazło swe odbicie w przebiegach prądów fazowych po wtórej stronie transformatorów zasilających napędy tyrystorowe badanych maszyn papierniczych. Prądy te stanowią, jak wiadomo, sumę wektorową prądów fazowych 3 przekształtników w przypadku szaf siłowych nr 1 i 7 przekształtników w przypadku szaf siłowych nr 2 (rys. 6.1, 6.2, 6.3). W związku z powyższym znaczne odkształcenie prądów fazowych pojedynczych przekształtników uległo tu częściowej niwelacji. Wybrane przebiegi sumy prądów fazowych przedstawiono na rysunku 7.4. Przebiegi te były gładkie, zatracaly charakter impulsowy, zmniejszały się współczynniki szczytu s . Natomiast bardzo widoczna była niesymetria fazowa, szczególnie układów zasilanych z szafy nr 1 maszyny papierniczej MP-2 w Skolwinie (tab. 7.7 oraz rys. 7.5).



Rys.7.4. Przebiegi prądów fazowych i_T zasilania napędów grupowych maszyn papierniczych (wg załącznika): a) szafa nr 1 MP-IV w Świeciu, b) szafa nr 2 MP-IV w Świeciu, c) szafa nr 1 MP-IV w Świeciu



Rys.7.5. Przebiegi prądów fazowych i_R , i_S , i_T zasilających szafę rozdzielczą nr 1 MP-2 w Skolwinie: a) prąd fazy R, b) prąd fazy S, c) prąd fazy T

T a b e l a 7.7.

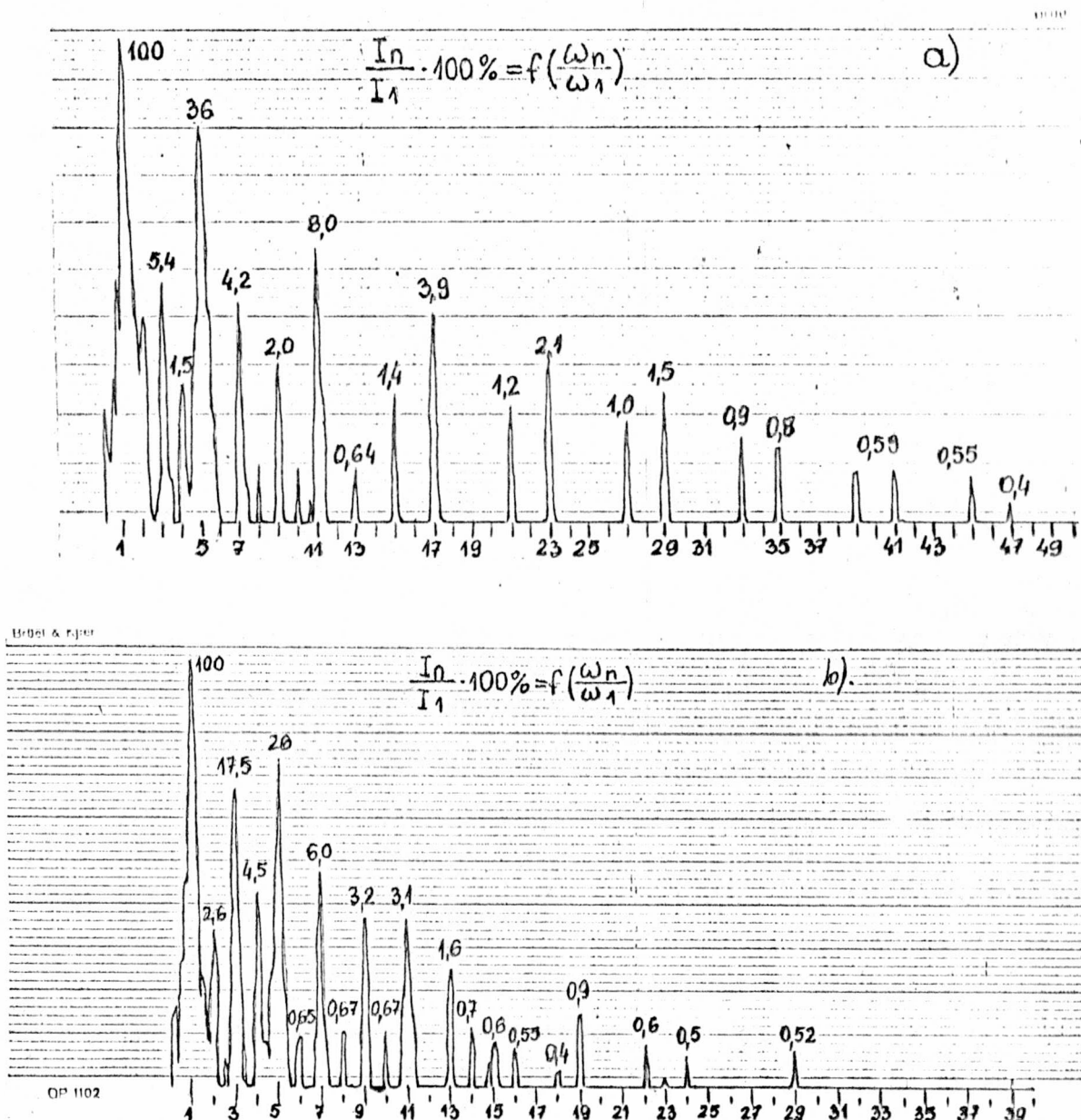
Wartości skuteczne oraz zawartości prądów poszczególnych harmonicznych po wtórnej stronie szafy siłowej nr 1 maszyny papierniczej MP-2 w Skolwinie

Rząd harmonicznej	Prąd fazy I_R		Prąd fazy I_S		Prąd fazy I_T	
	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]
2	18,1	2,5	17,2	2,2	42,0	7,0
3	126,9	17,5	78,0	10,0	48,0	8,0
4	23,2	3,2	19,5	2,5	27,0	4,5
5	232,0	32,0	171,6	22,0	186,0	31,0
6	0,0	0,0	5,5	0,7	8,4	1,4
7	39,9	5,5	14,0	1,8	54,0	9,0
8	4,3	0,6	7,8	1,0	4,5	0,75
9	31,2	4,3	27,3	3,5	10,2	1,7
10	6,2	0,85	3,3	0,43	6,0	1,0
11	24,0	3,3	23,4	3,0	31,8	5,3
12	0,0	0,0	3,1	0,4	2,4	0,4
13	14,5	2,0	13,3	1,7	20,4	3,4
14	5,8	0,8	6,2	0,8	3,3	0,55
15	4,7	0,65	7,8	1,0	7,5	1,25
16	0,0	0,0	3,7	0,48	4,2	0,7
17	2,2	0,3	7,4	0,95	9,0	1,5
18	3,3	0,45	3,6	0,46	2,4	0,4
19	8,0	1,1	6,2	0,8	9,0	1,5
20	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,45
21	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	0,8
22	4,3	0,6	0,0	0,0	3,6	0,6
23	2,2	0,3	3,3	0,42	4,1	0,68
24	3,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,6

Wartość skuteczna $I_R = 725 \text{ A}$
 $I_S = 780 \text{ A}$
 $I_T = 600 \text{ A}$

Czynnikami powyższe znalazły odbicie w widmach amplitudowo-częstotliwościowych:

- zmniejszyły się wartości amplitud harmonicznych charakterystycznych, zwłaszcza wysokiego rzędu, przez co zmniejszył się zakres częstotliwościowy widma (rys. 7.6 oraz 4.5a),



Rys.7.6. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przebiegów prądów fazowych zasilających szafy rozdzielcze: a) szafa nr 1 MP-IV w Świeciu, prąd w fazie S; b) szafa nr 1 MP-2 w Skolwinie, prąd w fazie R

- znacznemu zmniejszeniu uległy wartości amplitud harmonicznych parzystych, bowiem przebiegi prądów fazowych zasilających szafy są znacznie bardziej symetryczne w obrębie okresu (rys. 7.7a i 4.5a),

- uśrednieniu uległy wartości amplitud harmonicznych rzędów $n=3k$, np. wartości amplitud 3-cich harmonicznych w przebiegach prądów PANT-ów MP-2 w Skolwinie wynosiły 4,8% i 22%, a w przebiegu prądu zasilania szafy wynosiły 17,5% (rys. 7.6b).

W tabeli 7.8 przedstawiono wartości skuteczne oraz zawartości poszczególnych harmonicznych prądów po wtórnej stronie transformatorów zasilających tyrystorowe napędy maszyn papierniczych MP-2 w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Świeciu.

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, że odkształcenie prądu po stronie wtórnej transformatorów prostownikowych jest stosunkowo duże, jakkolwiek mniejsze niż w przypadku napędów indywidualnych. Stopień tego odkształcenia zależy bezpośrednio od obciążenia poszczególnych przekształtników. Obciążenie to z punktu widzenia zawartości harmonicznych w prądzie zasilającym jest zbyt małe w stosunku do mocy znamionowej przekształtników. Sposób doboru mocy dysponowanej napędów poszczególnych sekcji maszyn papierniczych podano w załączniku.

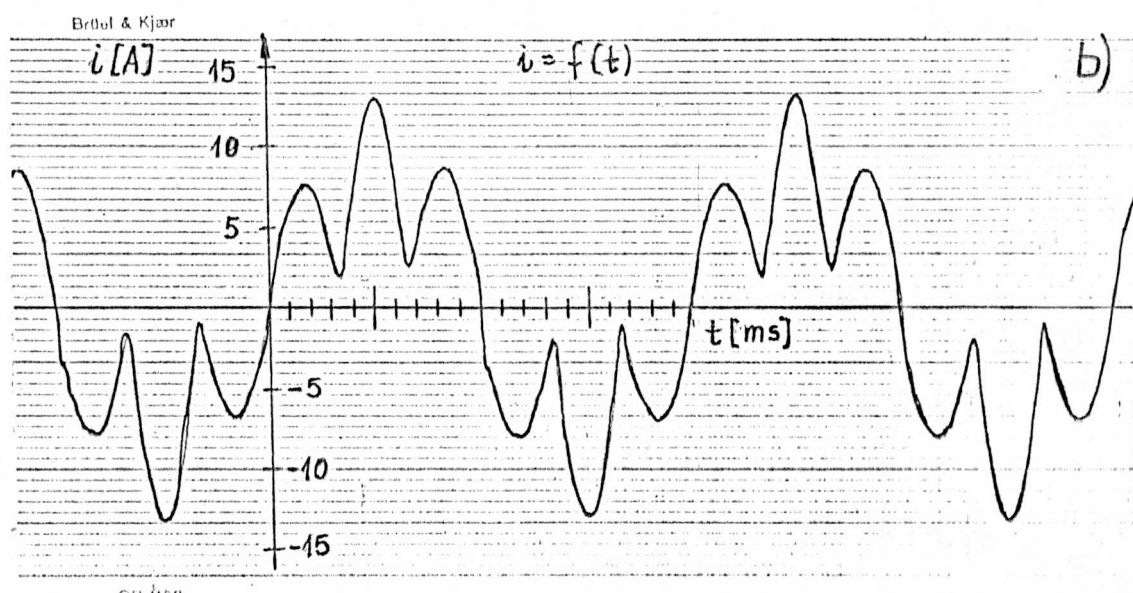
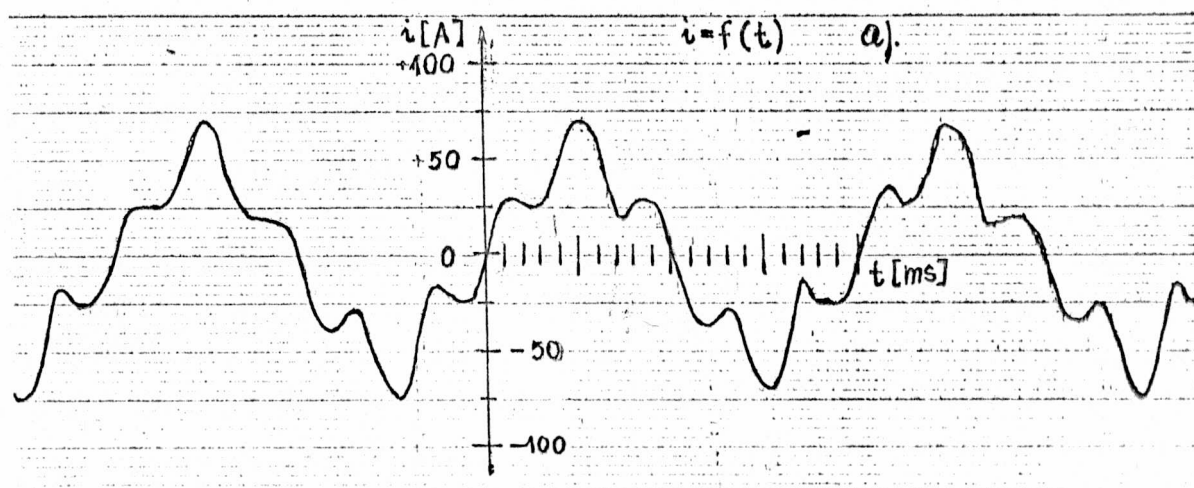
7.2.4. Analiza prądów przewodowych po stronie 6 kV transformatorów prostownikowych

Prądy przewodowe po pierwotnej stronie (6 kV) transformatorów zasilających napędy maszyn papierniczych są, przy uwzględnieniu przekładni transformatora, sumą geometryczną prądów fazowych po stronie 0,4 kV przy dodatkowym przesunięciu fazowym wynikającym z grupy połączeń uzwojeń transformatora Dy5. W związku z tym kształty tych przebiegów są odmienne od analizowanych poprzednio. Przebiegi straciły zupełnie charakter impulsowy, odznaczają się większą symetrią w obrębie jednego okresu, mają jednak kształt wyraźnie podkreślający występowanie 5-tej harmonicznej o znacznej amplitudzie (rys. 7.7).

T a b e l a 7.8.

Wartości skuteczne oraz zawartość poszczególnych harmoniczných po wtórnej stronie transformatorów zasilających napędy MP-2 w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Świeciu

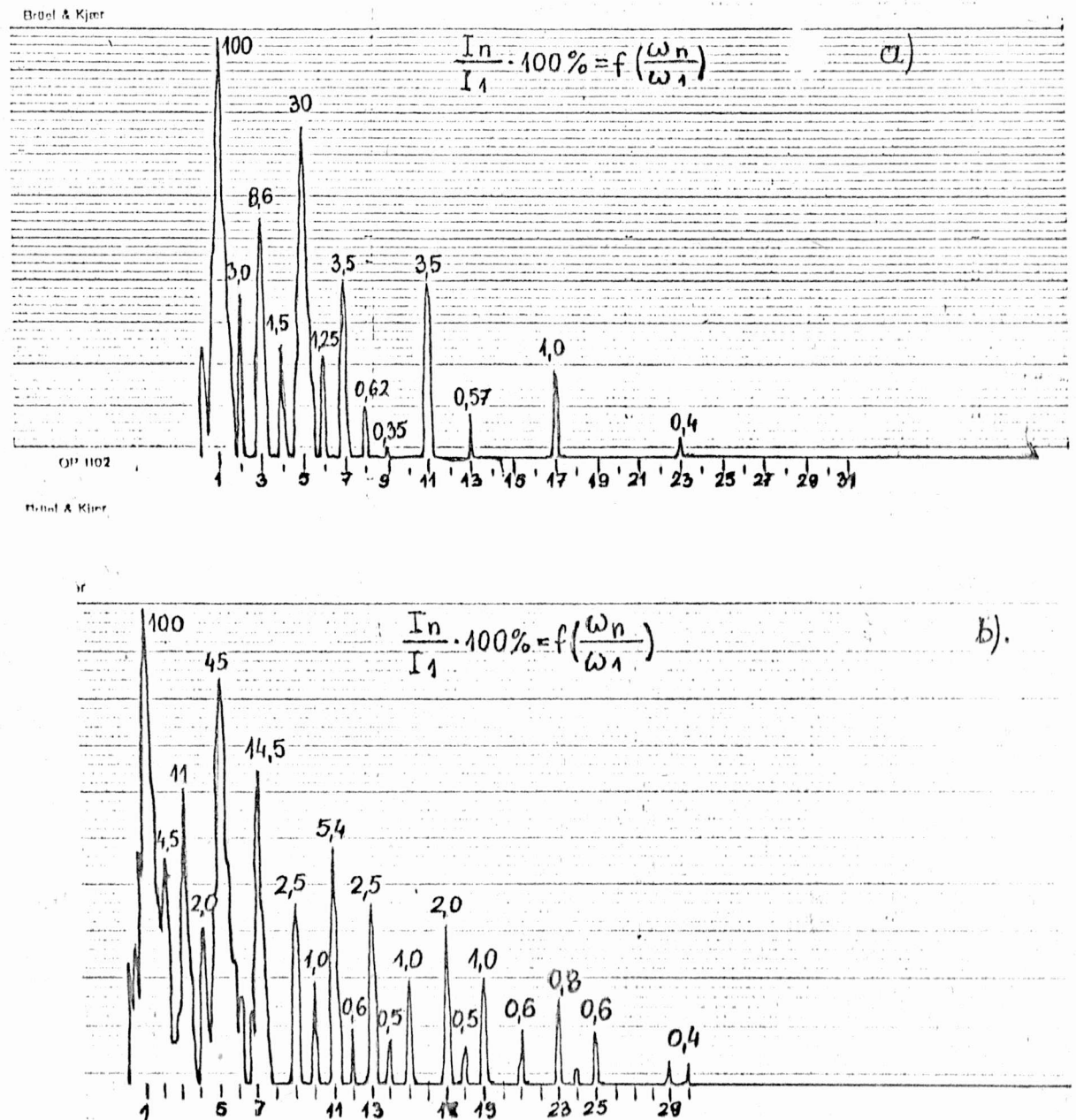
Rząd harmonicznej	Szafa nr 1, prąd i_S MP-IV w Świeciu		Szafa nr 2, prąd i_S MP-IV w Świeciu		Szafa nr 1, prąd i_T MP-V w Świeciu		Szafa nr 2, prąd i_R MP-2 w Skolwinie	
	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]
1	28,0	3,7	8,4	2,0	39,2	4,0	54,0	10,0
3	40,8	5,4	16,8	4,0	0,0	0,0	27,0	5,0
4	11,3	1,5	8,4	2,0	8,8	0,9	4,0	0,75
5	271,8	36,0	159,6	38,0	274,4	28,0	140,4	26,0
6	8,3	1,1	0,0	0,0	8,8	0,9	5,9	1,1
7	31,7	4,2	39,9	9,5	20,1	2,1	13,0	2,4
8	4,7	0,62	1,5	0,35	11,8	1,2	0,0	0,0
9	15,1	2,0	4,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	4,5	0,6	2,9	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
11	60,4	8,0	24,0	5,7	76,4	7,8	20,5	3,8
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	4,8	0,64	5,5	1,3	20,1	2,1	0,0	0,0
14	0,0	0,0	2,1	0,5	7,8	0,8	0,0	0,0
15	10,6	1,4	2,7	0,64	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	1,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
17	28,7	3,8	6,7	1,6	35,3	3,6	4,9	0,9
18	0,0	0,0	1,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	1,9	0,45	14,7	1,5	0,0	0,0
20	0,0	0,0	1,9	0,45	6,9	0,7	0,0	0,0
21	9,1	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	15,8	2,1	3,8	0,9	19,6	2,0	0,0	0,0
24	0,0	0,0	1,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	12,7	1,3	0,0	0,0



Rys.7.7. Przebiegi prądów przewodowych i_R transformatorów zasilających napędy tyrystorowe maszyn papierniczych po stronie 6 kV: a) zasilanie szafy nr 2 MP-2 w Skolwinie; b) zasilanie szafy nr 2 MP-IV w Świeciu

Powyższe cechy znajdują odzwierciedlenie w widmach amplitudowo-częstotliwościowych (rys. 7.8):

- zdecydowanie ograniczył się zakres częstotliwościowy widma, dzięki zanikowi harmonicznych wysokiego rzędu, związanych z impulsowym charakterem przebiegu po stronie 0,4 kV (rys. 7.8a),



Rys.7.8. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa prądów przewodowych i_R transformatorów zasilających po stronie 6 kV: a) szafę nr 2 MP-2 w Skolwinie, b) szafę nr 2 MP-V w Świeciu

- występuje 5-ta harmoniczna o dużych wartościach amplitud sięgających 45%, co jest wynikiem znacznych wartości amplitud piątych harmonicznych w przebiegach przekształtników po stronie 0,4 kV (rys. 7.8a i b),

- występuje znaczna zawartość 3-ciej harmonicznej, której amplitudy dochodzą do 10%, co świadczy o utrzymującej się znacznej niesymetrii prądów przewodowych (rys. 7.8a),

- występuje znaczna zawartość 2-giej harmonicznej, której amplitudy dochodzą do 8%.

T a b e l a 7.9.

Wartości skuteczne prądów przewodowych i_R oraz zawartości poszczególnych harmonicznych po stronie 6 kV transformatorów zasilających napędy maszyn papierniczych MP-2 w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Świeciu

Rząd harmonicznej	MP-IV Świecie Transformator T-1/2		MP-IV Świecie Transformator T-2/2		MP-V Świecie Transformator T-2/2		MP-2 Skolwin Transformator Tr7		MP-2 Skolwin Transformator Tr 7a	
	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]	wartość prądu harmonicznej [A]	zawartość procentowa [%]
2	0,75	3,0	0,4	4,5	2,2	3,5	3,8	8,1	1,1	3,0
3	1,12	4,5	0,99	11,0	0,0	0,0	4,2	9,0	3,0	8,0
4	0,25	1,0	0,18	2,0	0,3	0,5	0,8	1,8	0,6	1,5
5	7,75	31,0	4,0	45,0	18,9	30,0	14,4	31,0	10,6	28,0
6	0,22	0,9	0,05	0,6	0,5	0,8	0,0	0,0	0,5	1,25
7	0,37	1,5	1,3	14,5	1,4	2,2	3,2	6,9	1,2	3,2
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	1,3	0,0	0,0	0,1	0,42
9	0,42	1,7	0,22	2,5	0,0	0,0	1,0	2,1	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,09	1,0	0,0	0,0	0,4	0,84	0,0	0,0
11	1,55	6,2	0,49	5,4	4,4	7,0	1,9	4,2	0,9	2,5
12	0,0	0,0	0,05	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,27	1,1	0,22	2,5	1,6	2,5	0,9	2,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,04	0,5	0,6	1,0	0,2	0,5	0,0	0,0
15	0,31	1,25	0,09	1,0	0,0	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,42	0,0	0,0
17	0,72	2,9	0,18	2,0	2,4	3,8	0,4	0,9	0,2	0,52
18	0,0	0,0	0,04	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,25	1,0	0,09	1,0	1,2	1,9	0,4	0,8	0,0	0,0

W tabeli 7.9 przedstawiono wartości prądów oraz zawartości poszczególnych harmoniczných po stronie 6 kV transformatorów zasilających poszczególne napędy maszyn papierniczych MP-2 w Skolwinie oraz MP-IV i MP-V w Świeciu.

7.3. Analiza przebiegów napięć po stronie 0,4 kV i 6 kV transformatorów zasilających napędy przekształtnikowe

Odkształcenie napięcia spowodowane jest, jak wiadomo, przepływem odkształconego prądu w sieci zasilającej wywołującym spadki napięcia na impedancjach elementów tej sieci. Dla przebiegów okresowych, korzystając z zasady superpozycji, można analizę przeprowadzić osobno dla poszczególnych harmoniczných napięcia i prądu:

$$U_n = I_n \cdot Z_n \quad (7.2)$$

gdzie: Z_n - impedancja sieci zasilającej dla harmonicznej rzędu n .

Z zależności tej wynika, że wartość n -tej harmonicznej napięcia jest proporcjonalna do n -tej harmonicznej prądu odkształconego, wymuszonego przez odbiornik nieliniowy oraz do impedancji dla n -tej harmonicznej układu sieciowego licząc od strony zacisków odbiornika nieliniowego. Po uproszczeniach zależność (7.2) można przekształcić do postaci:

$$\frac{U_n}{U_{zn}} = n K_n K_{ob} K_r \frac{P_{zn}}{S_{zw}} 100\%, \quad (7.3)$$

gdzie: K_n - wartość względna amplitudy harmonicznej prądu rzędu n w stosunku do amplitudy harmonicznej podstawowej,

K_{ob} - współczynnik obciążenia prostownika w stosunku do obciążenia znamionowego,

K_r - współczynnik uwzględniający rozływ n -tej harmonicznej w sieci zasilającej,

P_{zn} - moc znamionowa prostownika,

U_{zn} - napięcie znamionowe sieci zasilającej.

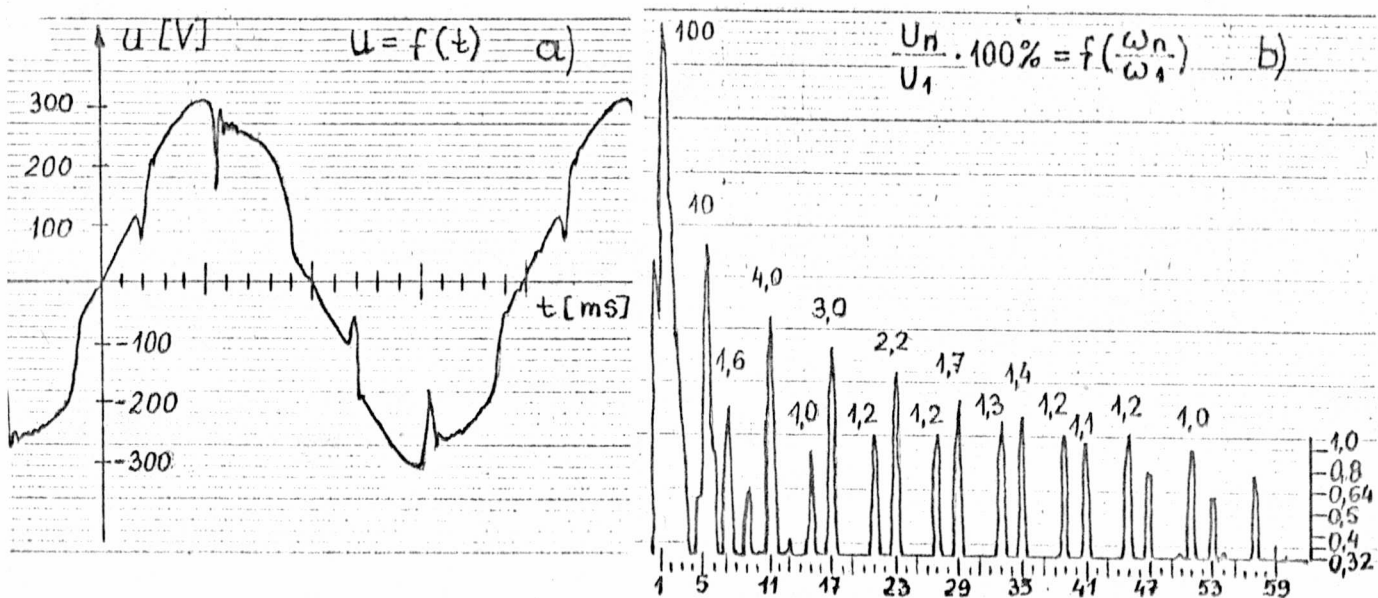
Analizując zależności (7.3) można wysnuć następujące wnioski:

- dla przeciętnych warunków pracy badanych maszyn papierniczych odkształcenia przebiegów napięć na zaciskach 0,4 kV transformatorów zasilających mogą być znaczne z powodu dużych odkształceń przebiegów prądów zasilających układy przekształtnikowe, niezbyt dużej mocy zwarciowej na zaciskach 0,4 kV w stosunku do mocy zainstalowanej w układach przekształtnikowych oraz braku możliwości rozprężu składowych prądu o wyższych częstotliwościach do odbiorników o charakterze liniowym,

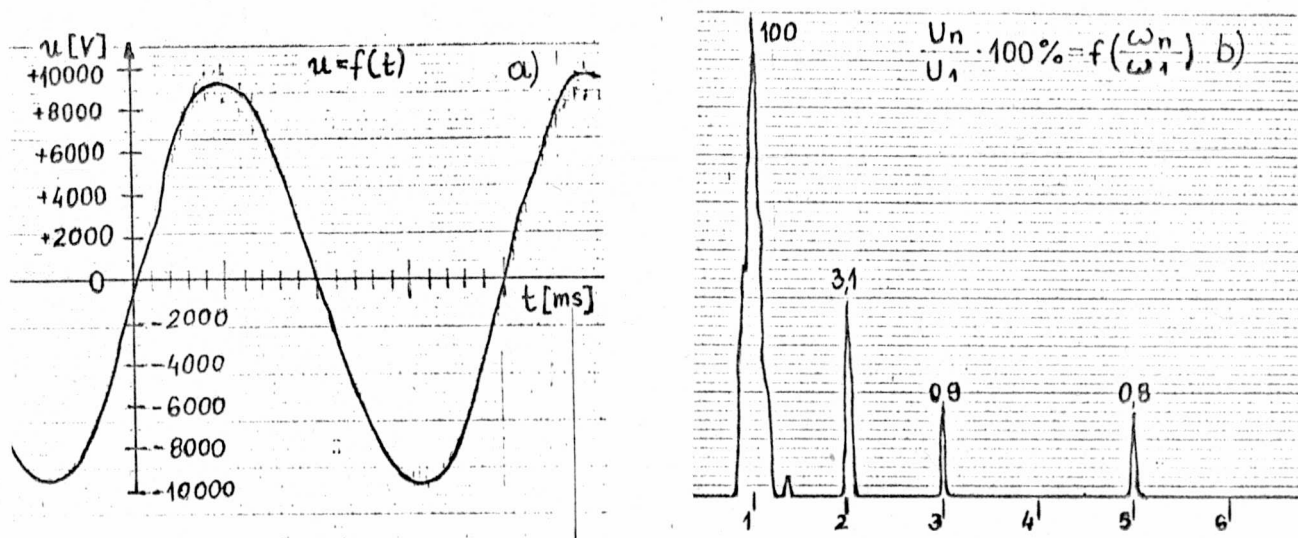
- ze względu na indukcyjny charakter impedancji zastępczej układu zasilającego oraz ze względu na niewielkie wartości amplitud harmonicznych prądu wysokiego rzędu w widmie amplitudowo-częstotliwościowym napięć fazowych nie powinny występować harmoniczne wyższych rzędów,

- ze względu na to, że układy przekształtnikowe typu PANT oraz TYRAK posiadają dławiki komutacyjne po stronie zasilania odkształcenie napięcia powinno być mniejsze, niżby to wynikało z zależności (7.3), a załamania komutacyjne winny być znacznie ograniczone, tak pod względem amplitudy, jak i czasu trwania.

Wnioski te znalazły potwierdzenie na drodze pomiarowej. Charakterystyczne przebiegi oraz ich widma przedstawiono na rysunku 7.9 i 7.10.



Rys.7.9. Napięcie fazowe u_{G0} zasilające szafę nr 1 MP-IV w Świeciu: a) przebieg wartości chwilowych, b) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa



Rys.7.10. Napięcie skojarzone URS pierwotnej strony transformatora nr T7 zasilającego szafę nr 2 MP-2 w Skolwinie: a) przebieg wartości chwilowych, b) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa

Widma amplitudowo-częstotliwościowe napięć fazowych po stronie 0,4 kV (rys. 7.9b) zawierają niewiele harmoniczných, jednak o stosunkowo dużych wartościach, rzędu kilku procentów. Wartości te są niższe niż by wynikało z obliczeń. W widmach uśrednionych widać niewielki wpływ załamań komutacyjnych, gdyż, jak wynika z przebiegów czasowych napięcia (rys. 7.9a), są one bardzo krótkotrwałe. W widmie napięcia fazowego MP-2 w Skolwinie występuje harmoniczna drugiego rzędu, której kilkuprocentowa wartość amplitudy nie znajduje potwierdzenia w widmie przebiegu prądu. Można to uzasadnić tylko występowaniem tej składowej w napięciu generatorów siłowni własnej. Współczynniki odkształcenia napięcia obliczone na podstawie widm amplitudowo-częstotliwościowych osiągają wartości około 8%, a zmierzone przy użyciu miernika PZM-9 około 10%, tabele 7.1 do 7.3. Są one więc znaczne, jednak nie odbiegające od przeciętnych wartości w tego typu układach. Przebiegi napięć skojarzonych po stronie 6 kV transformatorów zasilających są nieznacznie odkształcone. Pomijając stosunkowo dużą zawartość 2-giej harmoniczných, rzędu 3% w napięciu skojarzonym MP-2 w Skolwinie, znajdującą uzasad-

nienie w występowaniu w napięciu generatorowym, pozostałe składowe widma: 3-cia i 5-ta harmoniczna nie przekraczają wartości 1%. Współczynnik odkształcenia w przypadku MP-2 w Skolwinie równa się praktycznie wartości amplitudy 2-giej harmonicznej. Niskie odkształcenie napięcia skojarzonego po stronie 6 kV znajduje swoje uzasadnienie w znacznej wartości mocy zwarciowej na szynach 6 kV (stosunek mocy zainstalowanej odbiorników nielibiowych do mocy zwarciowej nie przekracza 1%) i w geometrycznym sumowaniu się napięć wynikającym z grupy połączeń transformatorów Dy5.

7.4. Podsumowanie

Na podstawie wykonanych badań i analiz wyższych harmonicznych w obwodach zasilania napędów tyrystorowych maszyn papierniczych można wyciągnąć następujące wnioski:

Maszyna papiernicza MP-2 w Skolwinie ma dużo mniejszą moc zainstalowaną w odbiornikach o charakterze liniowym niż maszyny MP-IV i MP-V w Świeciu, przy praktycznie tej samej mocy zainstalowanej w przekształtnikach. Jest to powodem występowania większych odkształceń zarówno w prądzie, jak i w napięciu zasilającym napęd MP-2 w Skolwinie. Układy sterowania, zabezpieczeń i regulacji są zasilane znacznie odkształconym napięciem. Powoduje to ich wadliwe działanie. W celu poprawy niezawodności działania powyższych układów należałoby zasilać je z odrębnego transformatora 6/0,4 kV, gdyż napięcie na poziomie 6 kV jest stosunkowo mało odkształcone. Pomiary wskazują, że przyjmowanie prostokątnego lub trapezowego przebiegu prądów fazowych do analizy harmonicznej powoduje duże błędy, szczególnie dla harmonicznych niższych rzędów. Przykładowo dla harmonicznej 5-go rzędu błąd wynosi około 25%. Jest to szczególnie istotne dla układów rzeczywistych, ponieważ oznacza 2,5-krotne przekroczenie wartości dopuszczalnej. Przekształtniki są obciążone w małym stopniu co powoduje, że przebiegi prądów mają charakter zbliżony do impulsowego, tym samym znacznie wzrasta odkształcenie przebiegów prądów fazowych i przewodowych. Duże współczynniki odkształcenia krzywej napięcia ψ i prądu λ dla trzech badanych maszyn papierniczych wskazują na znaczne pogorszenie jakości energii elektrycznej przez napędy tyrystorowe.

8. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

Wyniki przeprowadzonej analizy teoretycznej oraz badań przemysłowych można podsumować w formie następujących wniosków; dotyczących oddziaływania napędów tyrystorowych z prostownikami sześciopulsowymi na sieć zasilającą:

I. Wnioski wynikające z analizy teoretycznej

I.1. Przy wyznaczaniu widma prądu zasilającego napędy tyrystorowe z prostownikiem sześciopulsowym, gdyż takie są stosowane w polskich papierniach, niezbędne jest uwzględnienie wpływu pulsacji prądu obciążenia prostownika na wartość amplitud harmonicznych prądu. Nieuwzględnienie pulsacji prądu obciążenia prostownika może spowodować różnice w obliczonych wartościach amplitud harmonicznych prądu rzędu 100% w stosunku do wartości rzeczywistych.

I.2. Zasilanie układów sterowania prostowników tyrystorowych z tych samych transformatorów, co ich obwody siłowe powoduje powstawanie w widmie prądu pobieranego przez prostownik z sieci zasilającej harmonicznych nietypowych o znacznych (rzędu 6%) amplitudach.

I.3. Wypadkowy prąd harmoniczny kilku prostowników zasilanych z tego samego transformatora jest z bardzo dużym prawdopodobieństwem $p=0,99$ niewiekszy niż 90% ich sumy arytmetycznej. Wykazano też, że wartość wektora sumy kilku prostowników I zmniejsza się liniowo wraz ze wzrostem liczby prostowników.

I.4. W celu dokładnego wyznaczenia współczynnika odkształcenia krzywej napięcia ψ należy uwzględnić pulsacje prądu obciążenia. Współczynnik odkształcenia napięcia ψ można wyznaczyć na podstawie współczynników K_Q i K_U , należy się jednak w tym wypadku liczyć z około 30% błędem.

II. Wnioski z badań przemysłowych upoważniają do stwierdzenia, że:

II.1. Układy sterowania papierniczymi napędami tyrystorowymi należy zasiląć z odrębnych transformatorów niż ich obwody siłowe lub zastosować inny rodzaj sterowania (np. sterowanie

asynchroniczne^{*)} względem napięcia sieci). Poprawi to w znacznym stopniu jakość i dokładność sterowania, a tym samym przyczyni się do częściowego lub całkowitego wyeliminowania harmonicznych niecharakterystycznych w widmie prądu zasilającego.

II.2. Należy przeanalizować możliwość częściowego organizacji mocy zainstalowanej w tyrystorowych napędach maszyn papierniczych pod kątem oddziaływania tych napędów na sieć zasilającą. Wymagać to będzie dokładnej analizy z uwzględnieniem również aspektów ekonomicznych i wiązać się będzie prawdopodobnie z wprowadzeniem nowego typoszeregu produkowanych obecnie w kraju przekształtników dla papiernictwa.

II.3. Wielkość zakłóceń wprowadzanych do sieci zasilającej przez papiernicze napędy tyrystorowe produkcji polskiej nie odbiega od zakłóceń wywoływanych przez napędy produkcji szwedzkiej ASEA.

Na podstawie przeprowadzonej analizy zweryfikowanej pomiarami, a także w oparciu o powyższe wnioski, w szczególności zaś wnioski I.1, I.3, I.4 autor uważa obie postawione na wstępie pracy tezy za w pełni udowodnione.

W przodujących firmach, produkujących napędy elektryczne, takich jak ASEA, Siemens, Strömberg czy Harland Simons, trwają obecnie prace nad nowymi rozwiązaniami napędu elektrycznego maszyn papierniczych. Wyniki badań wskazują, że w przyszłości stosowany będzie impulsowy napęd prądu stałego lub przekształtnikowy napęd prądu przemiennego.

^{*)} Sterowanie asynchroniczne polega na tym, że kąt wysterowania impulsów bramkowych liczony jest od poprzedzającego impulsu sterującego w odróżnieniu od sterowania synchronicznego, gdzie kąt sterowania zapłonem synchronizowany jest względem przebiegu napięcia sieci zasilającej.

Jedną z przyczyn tych poszukiwań jest chęć uniknięcia niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą. Sądzi się bowiem, że nakłady na urządzenia przeciwzakłóceńowe będą w niedalekiej przyszłości wyższe niż nakłady na nowe rozwiązanie napędu elektrycznego. Jednak w obecnej chwili problemy oddziaływania tyrystorowych napędów maszyn papierniczych są problemem dominującym.

Autor uważa, że jego propozycje metodyki analizy oddziaływania tyrystorowych napędów maszyn papierniczych na sieć wewnętrzną papierni, w szczególności zaś uwzględnienie wpływu pulsacji prądu obciążenia prostownika na widmo prądu pobieranego z sieci zasilającej oraz określenie wypadkowego prądu harmonicznego kilku prostowników zasilanych z jednego transformatora są pewnym odmiennym potraktowaniem rozpatrywanego zagadnienia niż to jest w literaturze podawane. Tym samym zdaniem autora stanowi jego oryginalny wkład do badań tych problemów.

LITERATURA

- [11] Czajkowski A., Napęd tyrystorowy prądu stałego, WNT, Warszawa, 1974.
- [12] Kummel F., Elektrische Antriebstechnik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1971.
- [13] Lappe R., Leistungselektronik, VEB Verlag Technik Berlin, 1978.
- [14] Moltgen G., Netzgeführte Stromrichter mit Thyristoren, 3 Aufl. Berlin-München: Siemens AG. 1974.
- [15] Pelly B.R., Tyrystorowe przekształtniki i cyklokonwertery, WNT, Warszawa 1976.
- [16] Projektowanie przekształtników tyrystorowych, Praca zbiorowa, WNT, Warszawa 1974.
- [17] Rudienko S.N., Čiženko W.S., Sieńko G.N., Prieobrazowatielnaja tehnika, Wišča škoła, 1978.
- [18] Schilling W., Thyristortechnik, Oldenbourg Verlag München, Wien 1968.
- [19] Tunia H., Winiarski B., Podstawy energoelektroniki, WNT, Warszawa 1980.
- [10] Urbański S., Napęd elektryczny maszyn papierniczych, WNT, Warszawa 1974.
- [11I] Wasserrab Th., Schaltungslehre der Stromrichtertechnik, Springer Verlag-Berlin / Göttingen / Heidelberg 1962.
- [12I] Zach F., Leistungselektronik, Springer Verlag Wien-New York 1979.

Publikacje różne

- [13] Anisimow Ja.F., Żuk A.K., Petrow V.M., Garmoničeskij analiz napriazhenij i tokow na pervičnoj stronie wentilnych preobrazowatielej pri niesimetrii pitajuščich napriazhenij. Izwiestia wysšich učebnych zawiedieni, Elektromechanika nr 11, 1977, s. 1221-1227.
- [14] Arremann H., Moltgen G., Oberschwingungen im netzseitigen Stromschpulsiger netzgeführter Stromrichter. Siemens Forschungu. Entwicklung Bd 7, Nr 2, 1978, s.71-76.
- [15] Białkiewicz Z., Jakubczak J., Książek J., Wpływ przekształtników tyrystorowych na odkształcenie napięcia w sieci. Energetyka nr 7/8, 1981, s. 277-280.

- [16] Białkiewicz Z., Polaczek A., Oddziaływanie na sieć elektroenergetyczną maszyn wyciągowych zasilanych z przekształtników tyrystorowych. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 8/9, 1975, s. 35-38.
- [17] Białkiewicz Z., Polaczek A., Wyższe harmoniczne w prądzie pobieranym przez przekształtniki tyrystorowe w układzie mostkowym. Energetyka vol. 32 nr 3, 1978, s. 114-118.
- [18] Bisztyga K., Piróg S., Oddziaływanie przemysłowych odbiorników energii elektrycznej na sieć zasilającą, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 22, 1976, s. 569-571.
- [19] Bodura E., Oddziaływanie przekształtników tyrystorowych na sieć zasilającą, Problemy projektowania hutnictwa, vol. 24 nr 11, 1976, s. 317-323.
- [20] Büchner P., Wolf H., Beherrschung von Stromrichter-Netzrückwirkungen. Elekt. Prakt. vol. 35 nr 4, 1981, s. 140-142.
- [21] Charlow N.N., Garmoničeskij sostaw tokow trechfaznogo mostowego prezobrazowatiela pri pitanii ot niesinusoidalnoj sistiemy pieriemennogo toka. Tomskoj Politečničeskij Institut, Tomsk 1979, nr 169-d/79.
- [22] Crevier D., Mercier A., Estimation of higher frequency network equivalent impedances by harmonic analysis of natural waveforms. IEEE Trans. Power. Appar. Syst. vol. 97 nr 2, 1978, s. 424-431.
- [23] Czerepanow W.W., Wlijanie otkłonenii napriazhenija seti na amplitudy i fazy garmonik pierwičnych tokow wentilnych prezobrazowatielej nieprerwywnych stanow gorjačej prokatki. Trudy Moskovskogo Energetičeskogo Instituta, vyp. 103, 1972, s. 73-78.
- [24] Dobinson L.G., Tradition changes with harmonics. 2 nd International Conference on Power Electronic-Power Semiconductor and their Application, London 1977, s. 179-183.
- [25] Fesenko E.A., Garmoničeskij analiz krivych toka prezobrazowatielej s neodrwrodnymi ventylnymi grupami. Westnik Char'kovskogo Politečničeskogo Instituta, nr 151, 1979, s. 75-77.

- [26] Galloway I.H., Harmonic line currents in large thyristor six-pulse converters. IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 11, nr 3, 1975, s. 256-262.
- [27] Geppart A., Polaczek A., Określenie stopnia odkształcenia napięcia w sieciach zakładów przemysłowych zasilających przekształtniki. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 4, 1977, s. 15-18.
- [28] Glinternik S.R., Ventilnyje preobrazowateli s iskustwiennoj komutaczej na wyšsich garmonikach toka i napriazhenija. Probl. preobrazowat. techn. Tezisy dokladov naučno-techničeskoj konferenciji, Kijev, č. 4, 1979, s. 3-6.
- [29] Górecki R., Analiza odkształcenia napięcia zasilającego 6-pulsowy przekształtnik mostkowy. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, vol. 15 nr 11, 1977, s. 19-23.
- [30] Górecki R., Analiza odkształcenia napięcia zasilającego 6-pulsowy przekształtnik mostkowy. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, vol. 16, 1978, nr 1, s. 24-29.
- [31] Harmonics, characteristic parameters, methods of study estimates of existiny values in the network. Electra nr 77, 1981, s. 35-54.
- [32] Hofmann F., Die Summenbildung von Oberschwingungen in Hochspannungsleitungen. Elektrische Bahnen H.9.(35 Jahrg 1964), s. 273-277.
- [33] Kloss A., Statistische Betrachtungen zur Oberschwingungsproblematik in Anlagen der Leistungselektronik. IFAC-Symposium. Düsseldorf 1974.
- [34] Krajczik I.S., Mazurow M.I., Tokmanowa I.A., Garmoničeskij sostaw pieremennogo toka mostowych šestifaznych prezobrazowatielej pri nesimetrii cepiej komutacii. Izwiestia wyšsich učebnych zawiedieni, Elektrotehnika nr 9, 1977, s. 1026-1036.
- [35] Kronberg M., Die Stromrichternetzrückwirkung als Ursache fehlerhafter Synchronisation netzgelöschter Stromrichter. Elektrie vol. 33 nr 3, 1979, s. 126-129, 166-167.
- [36] Lacina O., Paraletni chod stejonosměrných pohonů napájených polovodičovými měniči. Elektrotechn. Obzor, Praha 68 (1974) 12, s. 725-731.
- [37] Lemoine M., Mesure des impedances harmoniques d'un reseau de distribution d'energie par deux methodes non spectrales. Bull. Dir. Etud. Rech. Ser. B 1976 vol. B nr 1, s. 5-27.

- [38] Mijnaerends H., Terugwerking von gelijk-en wisselrichters op 50 Hz - netten. Pokytech. Tijdschr. Elektrotechn. Elektron. vol. 33 nr 11, 1978, s. 673-693.
- [38] Moltgen G., Besondere Eigenschaften des Stromrichters in zweipulsiger Brückenschaltung. Siemens Z. 41(1967) s. 127-133.
- [39] Moltgen G., Eigenschaften des Atomrichters in zwiepul-siger halbgesteuerter Brückenschaltung. Elektr. Bahnen 39(1968), s. 256-264.
- [40] Moltgen G., Spannungsoberschwingungen in Drehstromnetzen infolge Stromrichterlast. Siemens Forsch. u. Entw. Bol.3 (1974) Nr 1, s. 36-42.
- [41] Pawłowski M., Analiza porównawcza norm i zaleceń dotyczących wskaźników zniekształceń wprowadzanych do sieci zasilającej przez prostowniki tyrystorowe. IUE PWr, Raport serii PRE, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1980.
- [42] Pawłowski M., Badania eksperymentalne wyższych harmoniczn-nych prądu i napięcia zasilającego napędy tyrystorowe ma-szyn papierniczych. IUE, Raport serii PRE, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1981.
- [43] Pawłowski M., Metoda obliczania wyższych harmoniczn-nych w napięciu zasilającym prostowniki sześciopulsowe. IUE, Raport z serii SPR, Politechnika Wrocławska, Wroc-ław 1980.
- [44] Pawłowski M., Tyrystorowe napędy papiernicze a jakość energii elektrycznej w sieci wewnętrznej papierni. IUE Raport serii SPR, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1982.
- [45] Pawłowski M., Oddziaływanie tyrystorowych napędów pa-pierniczych na sieć wewnętrzną papierni. IUE, Raport z serii PRE, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1982.
- [46] Phandke A.G., Harlow I.H., Generation of abnormal har-monics in high-voltage AC-DC power systems. IEEE Trans. Power Appar. a Syst. vol. PAS-87, Nr 3, 1968, s. 875-866.
- [47] Proposed IEEE standard practices and requeriments for limiting harmonic currents and voltage generated by sta-tic power converters and application of reactive compen-sation equipment to static power converters. IAS Annual. Meet. IEEE Industry Applic. Society 1976, s. 679.

- [48] Retzmann D., Hochempfindliche Oberschwingungsunabhängige Messung der Gegenspannung mit Raumzeigerkomponenten. Archiv. f. Elektrotechn. 64(1981), s. 89-96.
- [49] Siebert G., Probleme bei der Parallelarbeit mehrerer Stromrichterantriebe an einem Anschlusspunkt. Techn. Univer. Dresden 29(1980) H2, s. 533-542.
- [50] Stratford R.P., Analysis and control of harmonic current in systems with static power converters. IEEE Trans. on Indust. Appl. IA-17, Nr 1, 1981, s. 71-80.
- [51] Uszakow Ju.A., Garmoničeskij analiz tokow trechfaznogo mostowego prezobrazovatela pri učete pulsatii wypramlennogo toka. Problem. elektroen. i elektromech. Leningrad. Nauka 1977, s. 130-141.
- [52] Uhlman E., Alternating voltage, direct voltage regulation and power factor of converter stations operating on AC systems of finite short-circuit capacity. Processing Instruments Elektr. Eng. C, 102(1955), s. 284-289.
- [53] Wargowsky E., Berechnung von Oberschwingungsströmen, die durch Drehstrom-Gleichrichternanlagen verursacht werden. Eitz Arch. nr 9, 1979, s. 269-274.
- [54] Winter P., Einfluss der Glättungs- und Kommutierungsreaktanz auf das Netzverhalten von mehrfach-folgegesteuerten Stromrichtern in einphasiger halbsteuerbarer Schaltung. Dissertation, Dokt. techn. Wiss. Techn. Hochsch. Zürich 1973.
- [55] Wolski A., Sołtysik K., Wpływ tyrystorowych układów napędowych na sieć zasilającą. Zesz.nauk. PŚl. nr 413, 1975, s. 113-125.
- [56] Reyler H., Wie entsteht "harmonische Instabilität" bei Wechselrichter-betrieb und wie kann sie vermieden werden. Dissert. Universität Stuttgart 1971.
- [57] Žeželenko I.V., Normirovanije urovnej garmonik s učetom ekonomičeskogo uščerba. Električestvo nr 5, 1976, s. 64-68.

Z A Ł A C Z N I K

1. OPIS BADANYCH OBIEKTÓW

1.1. Zasilanie napędu tyrystorowego prądu stałego maszyny MP-2 w SZP-Skolwin

Sieć energetyczna w Szczecińskich Zakładach Papierniczych "Skolwin" zasilana jest w Rozdzielni Sprzęgłowej (RS) i Rozdzielni Głównej (RG). Rozdzielnie posiadają podwójny system szyn o napięciu 6 kV. Szyny w RS nie są sekcjonowane i są zasilane z dwóch transformatorów 110/15/6 kV o mocach 16 MVA i 25 MVA. Szyny robocze w RG są podzielone na trzy sekcje, połączone ze sobą za pomocą dławikowych sprzęgieł podłużnych, szyny rezerwowe nie są sekcjonowane. Jedna z sekcji szyn roboczych w RG połączona jest za pomocą mostu szynowego z szynami RS, do drugiej dołączony jest generator 20 MVA, a do trzeciej generator 11 MVA. Z RG i RS zasilane są za pomocą sieci kablowej 6 kV rozdzielnie oddziałowe AO, AI, AII, AIII, AIV, AV i rozdzielnia bl. "B". Napęd elektryczny maszyny papierniczej MP-2 zasilany jest z rozdzielni AII (RA II). Rozdzielnia ta wyposażona jest w pojedynczy układ szyn, podzielony na dwie sekcje, sprzężone ze sobą za pomocą mostu szynowego. Z sekcji I szyn zasilane są silniki elektryczne prądu przemienne o łącznej mocy 1480 kVA, transformator 6/0,4 kV-1000 kVA i transformator nr 7 - 6/0,4 kV o mocy 800 kVA i układzie połączeń Dy5 zasilający szafę nr 2, zawierającą dwa układy przekształtnikowe PANT 250 i pięć PANT 100 napędu elektrycznego MP2. Z sekcji II szyn w RAII zasilane są silniki elektryczne prądu przemienne o łącznej mocy 1070 kVA, transformatory 6/0,4 kV o mocach 1000 kVA i 630 kVA oraz transformator nr 7a - 6/0,4 kV o mocy 800 kVA i układzie połączeń Dy5 zasilający szafę nr 1 zawierającą dwa układy przekształtnikowe PANT 500 i jeden PANT 100 napędu elektrycznego MP2. Moce zwarciove w omawianym układzie wynoszą:

- na szynach 110 kV: 1650 MVA,
- na szynach 6 kV w RG i RS, przy zamkniętym wyłączniku mostu szynowego: 320 MVA,
- na szynach 6 kV w RS, przy otwartym wyłączniku mostu szynowego: 240 MVA,
- na szynach 6 kV w RG, przy otwartym wyłączniku mostu szynowego: 82 MVA,
- na szynach 6 kV w RAII przy zamkniętym wyłączniku mostu szynowego tej rozdzielni: 250 MVA,
- na szynach I lub II sekcji 6 kV w RAII, przy otwartym wyłączniku mostu szynowego tej rozdzielni: 208 MVA,
- na szynach 0,4 kV szafy nr 1 lub szafy nr 2: 5,4 MVA.

Schemat ideowy części sieci energetycznej w SZP "Skolwin" zasilającej napęd elektryczny maszyny papierniczej MP2 przedstawiony jest na rysunku 6.1 (w tekście).

Silniki prądu stałego, wchodzące w skład napędu elektrycznego MP-2 są zasilane przez układy przekształtnikowe typu PANT, produkowane przez Fabrykę Transformatorów i Aparatury Trakcyjnej "ELTA" w Łodzi. W skład układu PANT wchodzi trójfazowy, sześciopulsowy, pełnosterowny, tyrystorowy prostownik mostkowy oraz układ regulacyjny, złożony z regulatora napięcia, regulatora prądu, regulatora prędkości przełącznika zmiany kierunku wirowania, zawierający człony sprzężenia prądowego i sprzężenia tachometrycznego. Układy PANT są wyposażone w dławiki komutacyjne po stronie zasilania, natomiast nie posiadają dławika po stronie prądu wyprostowanego. Dzięki zastosowaniu pełnosterownego mostka tyrystorowego i przełącznika zmiany kierunku wirowania układ umożliwia pracę falownikową, po dokonaniu zmiany kierunku napięcia wyjściowego prostownika względem aktualnie występującej SEM twornika. Występuje przy tym hamowanie elektryczne z częściowym zwrotem energii do sieci.

1.2. Zasilanie napędów tyrystorowych prądu stałego maszyn MP-4 i MP-5 w ZCiP w Świeciu

Sieć energetyczna w Zakładach Celulozy i Papieru w Świeciu zasilana jest z Rozdzielni Sprzęgłowej (RS) i Rozdzielni Głównej (RG). Rozdzielnie posiadają podwójny system szyn o napięciu 6 kV. Szyny w RS nie są sekcjonowane i są zasilane z dwóch transformatorów 110/15/6 kV o mocach 25 MVA i 16 MVA. Szyny robocze w RG są podzielone na pięć sekcji połączonych ze sobą za pomocą dławikowych sprzęgieł podłużnych, szyny rezerwowe nie są sekcjonowane. Pierwsza sekcja szyn roboczych w RG połączona jest za pomocą mostu szynowego z szynami RS, do drugiej dołączony jest generator 11,3 MVA, do trzeciej generator 13,7 MVA, do czwartej generator 40 MVA, i w końcu do piątej generator 40 MVA. Rozdzielnie oddziałowe zasilane są z RG przez dławiki dla zmniejszenia mocy zwarciowej w sieci 6 kV i na zaciskach odbiorników. Maszyna papiernicza MP4 zasilana jest z dwóch rozdzielni oddziałowych STR-14 i STR-15. Rozdzielnia STR-14 zasilana jest z sekcji III w RG, natomiast rozdzielnia STR-15 z sekcji IV. Napęd elektryczny maszyny papierniczej MP-4 zasilany jest z rozdzielni STR-15. Rozdzielnia ta jest wyposażona w pojedynczy, nie sekcjonowany, układ szyn. Z szyn tej rozdzielni zasilane są silniki elektryczne prądu przemiennego o łącznej mocy 3350 kW oraz dziesięć transformatorów 6/0,4 kV o mocy 800 kVA i układzie połączeń Dy5 każdy. Transformator T1/3 zasila szafę napędu tyrystorowego krajarki zwojów, natomiast transformatory T1/2 i T2/2 zasilają szafy nr 1 u 2 napędu tyrystorowego maszyny papierniczej MP-4. Szafa nr 1 zasila dwa układy przekształtnikowe PANT 500 i jeden PANT 100, natomiast szafa nr 2 zasila dwa układy przekształtnikowe PANT 250 i pięć układów PANT 100.

Schemat ideowy zasilania rozdzielni STR-14 i STR-15 zasilających maszynę papierniczą MP-4 przedstawiony jest na rysunku 6.2 (w tekście).

Maszyna MP-V zasilana jest z rozdzielni STR-9. Rozdzielnia ta zasilana jest z II sekcji w RG. Posiada ona pojedynczy układ szyn, podzielony na dwie sekcje, sprzężone ze sobą za pomocą mostu szynowego. Z sekcji I zasilane są silniki elektryczne prądu przemiennego o łącznej mocy 1370 kW oraz pięć

transformatorów 6/0,4 kV o mocy 800 KVA i grupie połączeń Dy5 każdy. Transformator T1/1 zasila szafę nr 2, zawierającą dwa układy przekształtnikowe YJMG 238 i pięć YJMG 79.7 napędu elektrycznego maszyny papierniczej MP-Vm. Z sekcji II szyn w STR-9 zasilane są silniki elektryczne prądu przemiennego o łącznej mocy 1450 kW oraz pięć transformatorów o identycznych parametrach, jak zasilane z sekcji I. Jeden z nich T2/1 zasila szafę nr 1 zawierającą dwa układy przekształtnikowe YJMG 379 i jeden YJMG 79.7 napędu elektrycznego maszyny papierniczej MP-V.

Moce zwarciove w omawianym układzie wynoszą:

- na szynach 110 kV: 1200 MVA,
- na szynach 6 kV w RG i RS, przy zamkniętym wyłączniku mostu szynowego: 324 MVA,
- na szynach 6 kV w RS, przy otwartym wyłączniku mostu szynowego: 247 MVA,
- na szynach 6 kV w RG, przy otwartym wyłączniku mostu szynowego: 77 MVA,
- na szynach 6 kV w STR-14 i STR-15 przy zamkniętym wyłączniku tych rozdzielni: 271 MVA,
- MP-IV - na szynach 6 kV w STR-15: 205 MVA,
- na szynach 0,4 kV szafy nr 1 i 2: 10,6 MVA,
- na szynach 0,4 kV szafy krajarki: 5,4 MVA,
- na szynach 6 kV w STR-9 przy zamkniętym wyłączniku tej rozdzielni: 256 MVA,
- MP-V - na szynach I lub II sekcji w STR-9, przy otwartym wyłączniku mostu szynowego tej rozdzielni: 211 MVA,
- na szynach 0,4 kV szafy nr 1 lub nr 2: 5,4 MVA.

Schemat ideowy części sieci energetycznej w ZCiP w Świeciu zasilającej napęd elektryczny maszyny papierniczej MP-V przedstawiony jest na rysunku 6.3 (w tekście).

Silniki prądu stałego, wchodzące w skład napędu elektrycznego MP-IV są zasilane przez układy przekształtnikowe typu PANT opisane w poprzednim rozdziale, natomiast w maszynie MP-V do zasilania silników prądu stałego wykorzystano przekształtniki typu TYRAK, YJMG, produkowane przez szwedzką firmę ASEA.

Układy YJMG są budowane jako trójfazowe, sześciopulsowe, pełnosterowne, tyrystorowe prostowniki mostkowe. Zawierają one ponadto układ regulacyjny złożony z regulatora napięcia, regulatora prądu, regulatora prędkości i przełącznika zmiany kierunku wirowania, zawierającego człony sprzężenia zwrotnego prądowego i tachometrycznego. Tak, jak układy typu PANT, układy typu YJMG wyposażone są w dławiki komutacyjne po stronie zasilania i nie posiadają dławika po stronie prądu wyprostowanego. Układy YJMG umożliwiają pracę falownikową napędu z częściowym zwrotem energii do sieci. Schematy ideowe napędów tyrystorowych PANT i YJMG przedstawiono na rysunkach 1.1 i 1.2 załącznika.

2. POMIARY PRĄDÓW I NAPIĘĆ ZASILAJĄCYCH TYRYSTOROWE NAPĘDY PAPIERNICZE MP-2 W SKOLWINIE ORAZ MP-IV i MP-V W ŚWIECIU

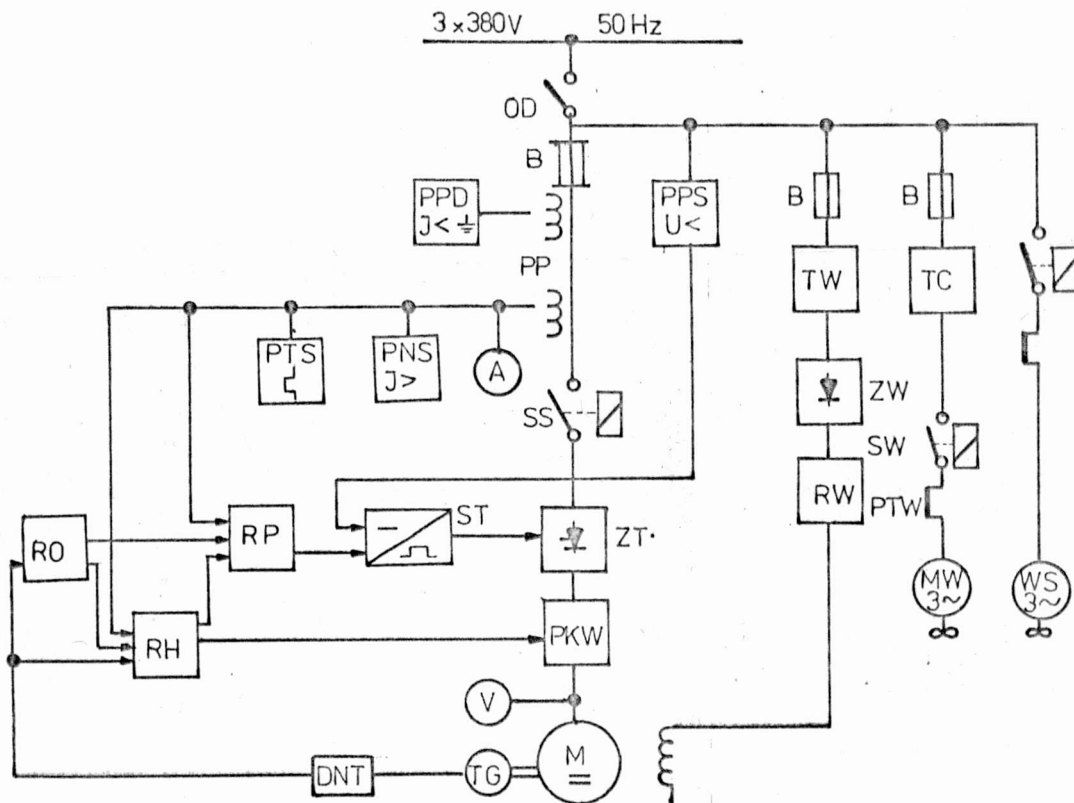
2.1. Lokalizacja punktów pomiarowych

Pomiary i rejestrację prądów i napięć zasilających papiernicze napędy tyrystorowe w SZP w Skolwinie oraz ZCiP w Świeciu wykonano wykorzystując następujące pola pomiarowe oraz cele zasilania szaf tyrystorowych w rozdzielniach tych zakładów:

- w SZP w Skolwinie:

Maszyna papiernicza MP-2

- a) rozdzielnia AII, sekcja I szyn 6 kV, pole pomiaru napięcia,
- b) rozdzielnia AII, sekcja I szyn 6 kV, pole transformatora nr 7,
- c) rozdzielnia AII, sekcja II szyn 6 kV, pole pomiaru napięcia,
- d) rozdzielnia AII, sekcja II szyn 6 kV, pole transformatora nr 7a,
- e) szafa nr 2, zasilająca układy przekształtnikowe 5 PANT 100 i 2 PANT 250, cela zasilania szafy nr 2 z transformatora nr 7,
- f) szafa nr 1, zasilająca układy przekształtnikowe PANT 100 i 2 PANT 500, cela zasilania szafy nr 1 z transformatora nr 7a,
- g) szafa nr 1, cela zasilania układu przekształtnikowego PANT 500 napędu sita,
- h) szafa nr 1, cela zasilania układu przekształtnikowego PANT 500 napędu I i II prasy ssącej.



Rys.1.2. Schemat ideowy napędu tyrystorowego TYRAK YJMG:
PPD - przekaźnik prądu doziemienia, PPS - przekaźnik pod-
napięciowy silnika, TC - transformator wentylatora silnika,
inne oznaczenia jak na rys. 6.4

- w ZCiP w Świeciu:

Maszyna papiernicza MP-IV

- rozdzielnia STR-15, szyny 6 kV, pole pomiaru napięcia,
- rozdzielnia STR-15, szyny 6 kV, pole transformatora T1/2,
- rozdzielnia STR-15, szyny 6 kV, pole transformatora T2/2,
- rozdzielnia STR-15, szyny 6 kV, pole transformatora T2/3,
- szafa nr 2, zasilająca układy przekształtnikowe 5 PANT 100 i 2 PANT 250, cela zasilania szafy nr 2 z transformatora T1/2,
- szafa nr 1, zasilająca układy przekształtnikowe PANT 100 i 2 PANT 500, cela zasilania szafy nr 1 z transformatora T2/2,
- szafa krajarki zwojów, zasilająca układ przekształtnikowy PANT 250, cela zasilania szafy krajarki zwojów z transformatora T2/3.

Maszyna papiernicza MP-V

- a) rozdzielnia STR-9, sekcja II szyn 6 kV, pole pomiaru napięcia,
- b) rozdzielnia STR-9, sekcja II szyn 6 kV, pole transformatora T2/2,
- c) szafa nr 1, zasilająca układy przekształtnikowe YJMG 79.7 i 2 YJMG 379, cela zasilania szafy nr 1 z transformatora T2/2,
- d) szafa nr 1, cela zasilania układu przekształtnikowego YJMG 379, napęd prasy ssącej,
- e) szafa nr 1, cela zasilania układu przekształtnikowego YJMG 379, napęd sita.

2.2. Aparatura użyta podczas pomiarów i obróbki laboratoryjnej

Pomiary i rejestrację przebiegów prądów i napięć zasilających prostowniki tyrystorowe wykonano w oparciu o unikalną aparaturę pomiarową. Wykorzystano zestaw przyrządów pomiarowych produkowanych przez duńską firmę Brüel-Kjaev.

Użyte przyrządy posiadały następujące dane:

1. Rejestrator magnetyczny typ 7003 o następujących danych znamionowych: cztery kanały pomiarowe, zapisujące w systemie FM, jeden kanał informacyjny z zapisem bezpośrednim, duże prędkości przesuwu taśmy, 38,1 cm/s $\pm 0,25\%$ i 3,81 cm/s $\pm 0,25\%$; zakres częstotliwości przy zapisie FM i prędkości przesuwu 38,1 cm/s wynosi od 0 do 12,5 kHz (± 1 dB) przy współczynniku sygnał-szum większy od 44 dB, a dla prędkości przesuwu 3,81 cm/s od 0 do 1 kHz (± 1 dB) przy współczynniku sygnał-szum większym od 39 dB; zakres wartości skutecznej sygnałów wejściowych od 1 do 50 V regulowany 34-decybelowym potencjometrem; impedancja wejściowa 100 k Ω /100 pF.

2. Generator sinusoidalno-szumowy typ 1024 o zakresie częstotliwości 20 Hz-20 kHz, mocy wyjściowej 2,5 W, zniekształceniu sinusoidy bez obciążenia dla 1 kHz mniejszym od 0,2%, współczynniku sygnał-szum większym od 70 dB, maksymalnej wartości skutecznej napięcia wyjściowego 40 V.

3. Woltomierz-wzmacniacz elektroniczny typ 2425 do pomiaru napięcia zmiennego w zakresie częstotliwości 0,5 Hz do 500 kHz z dokładnością $\pm 0,5$ dB, a w zakresie 2 Hz do 200 kHz

z dokładnością $\pm 0,2$ dB, o 12 zakresach pomiarowych od 1 mV do 300 V, z możliwością wskazywania ujemnej i dodatniej wartości szczytowej, rzeczywistej wartości skutecznej, wartości średniej oraz utrzymania wskazania maksymalnego, może być używany jako wzmacniacz pomiarowy o maksymalnym wzmacnieniu 60 dB,

4. Wzmacniacz mocy typ 2706 o zakresie częstotliwości od 10 Hz do 20 kHz, maksymalnej mocy wyjściowej 75 VA przy obciążeniu 3 Ω i ograniczeniu prądowym 5 A lub 1,8 A.

5. Cyfrowy rejestrator sygnałów przypadkowych typ 7502, przeznaczony do rejestracji sygnałów przypadkowych o krótkim czasie trwania, a następnie odtwarzania ich przy dowolnej prędkości transformacji. Szybkość próbkowania przyrządu przy rejestracji może wynosić od 100 do 100 000 prób/s przy odtwarzaniu zaś od 500 do 500 000 prób/s, co przy użyciu specjalnych filtrów dopłnoprzepustowych zezwala na rejestrację sygnałów w paśmie częstotliwości 0-25 kHz, a odtwarzanie sygnałów w paśmie częstotliwości 0-125 kHz. Przyrząd umożliwia wewnętrzne i zewnętrzne wyzwalanie oraz niezależny wybór prędkości próbkowania przy rejestrowaniu i odtwarzaniu, jak również umożliwia regulację poziomu wyzwalania, opóźniania i czasu rejestracji po wyzwoleniu.

6. Rejestrator X-Y typ 2308, umożliwia on zapis z szybkością narastania sygnału 1000 mm/s i z maksymalnym przyspieszeniem 100 m/s², w jednym z 15 skokowo wybieranych zakresów czułości od 20 μ V/mm do 1 V/mm i z jedną z 9 szybkości przesuwu od 0,2 do 100 mm/s.

7. Oscylograficzny, cyfrowo-pamięciowy, wąskopasmowy, wielokanałowy analizator częstotliwości typ 3348 o następujących parametrach: 11 zakresów częstotliwości od 0-10 Hz do 0-20 kHz, każdy zakres podzielony na 400 kanałów o stałej szerokości pasma $\beta = B/400$, $\beta_{3dB} = 1,5\beta \pm 5\%$, przy korekcji funkcją prostokątną lub funkcją wagi Hanna; dynamika 50 dB poniżej poziomu przeciążenia ciągłym sygnałem sinusoidalnym; możliwość przedstawienia spektrum na kalibrowanym ekranie lampy oscyloskopowej, rejestrogramie uzyskanym przy współpracy z rejestratorem typ 2307 lub wskaźniku cyfrowym typu Nixie. Wynik może być również zmagazynowany, później zaś poddany dalszemu procesowi przetwarzania danych. Analizator zaopatrzony jest w automatyczne

urządzenie, umożliwiające analizę przebiegów przypadkowych i nieustalonych, o z góry ustalonym poziomie wyzwania, pamięć magazynuje 800 próbek po i 400 próbek przed wyzwoleniem, możliwe jest uzyskanie kwadratu pojedynczych składowych widma do pomiaru widma gęstości mocy; 400-pozycyjny przełącznik steruje wskaźnikiem określającym częstotliwość i aktualny poziom sygnału w wybranym kanale. Analizator umożliwia dostarczenie co 45 ms nieuśrednionego widma sygnału oraz uśrednionej liniowo lub wykładniczo wybranej liczby statystycznie niezależnych widm sygnału przy jednym z ośmiu czasów uśredniania dla każdego zakresu częstotliwości. Posiada również dwie pamięci odczytu, co umożliwia porównanie dwóch różnych widm. Możliwe są trzy sposoby pracy: aktualizowanie przedstawionego na ekranie widma co 45 ms, porównanie bieżącego i uprzednio zapamiętanego stałego widma, porównanie dwóch uprzednio zapamiętanych widm.

8. Rejestrator poziomu typ 2307 o następujących danych znamionowych:

- zakres częstotliwości 2 Hz-200 kHz, maksymalna czułość $10 \text{ mV}_{\text{sk}}$,
- wymienny potencjometr ZR 005 o charakterystyce logarytmicznej, dynamice 50 dB, dokładności $\pm 0,3 \text{ dB}$,
- prędkość pisaka dla taśmy o szerokości 100 mm regulowana w 15 zakresach od 4 do 2000 mm/s,
- prędkość przesuwu papieru regulowana w 10 zakresach od 0,0003 do 100 mm/s,
- zdolność rozdzielcza dla taśmy o szerokości 100 mm-0,5 mm.

9. Heterodynowy filtr współbieżny typ 2021 o następujących danych:

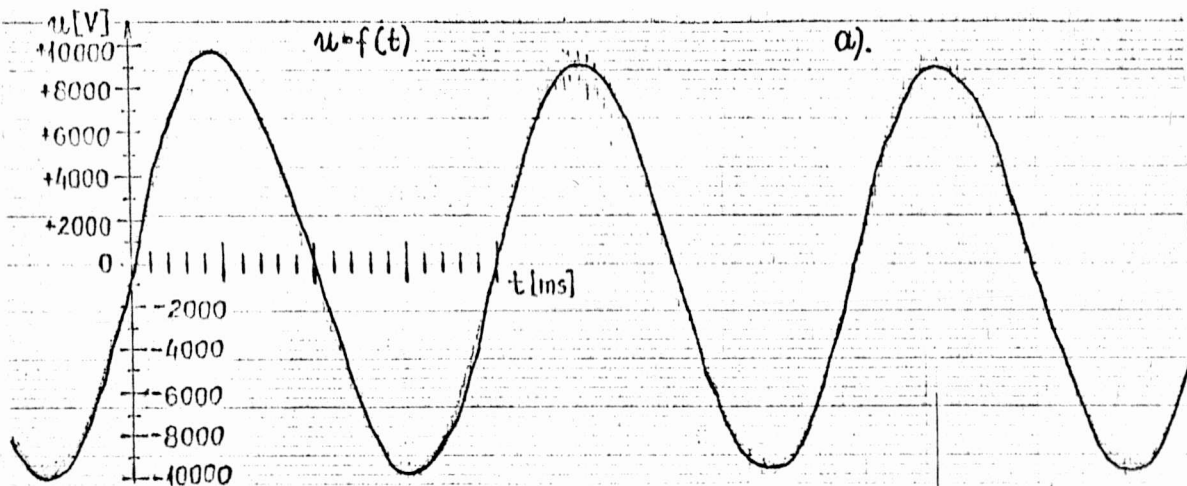
- zakres częstotliwości od 5 Hz do 10 kHz,
- wybór stałej szerokości pasma 3-decybelowego B_p o następujących wartościach: 3,16 Hz, 10 Hz, 31,6 Hz, 100 Hz, 316 Hz,
- zakres dynamiczny 75 dB.

10. Wzmacniacz pomiarowy typ 2607 o następujących danych:

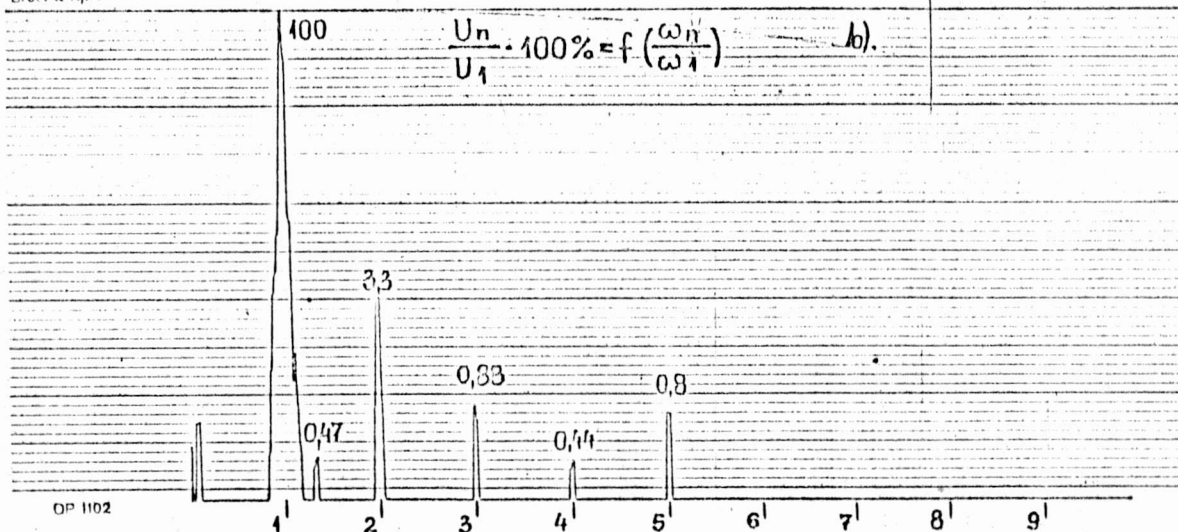
- zakres częstotliwości od 2 Hz do 200 kHz,
- zakres czułości napięć wejściowych od $10 \mu\text{V}$ do 300 V,
- zakres dynamiki wyjścia przy sygnale sinusoidalnym 60 dB.

Przy wykorzystaniu powyższej aparatury uzyskano zestaw rejestrogramów przedstawiających przebiegi sygnałów prądów oraz napięć zasilających badane napędy tyrystorowe maszyn papierniczych.

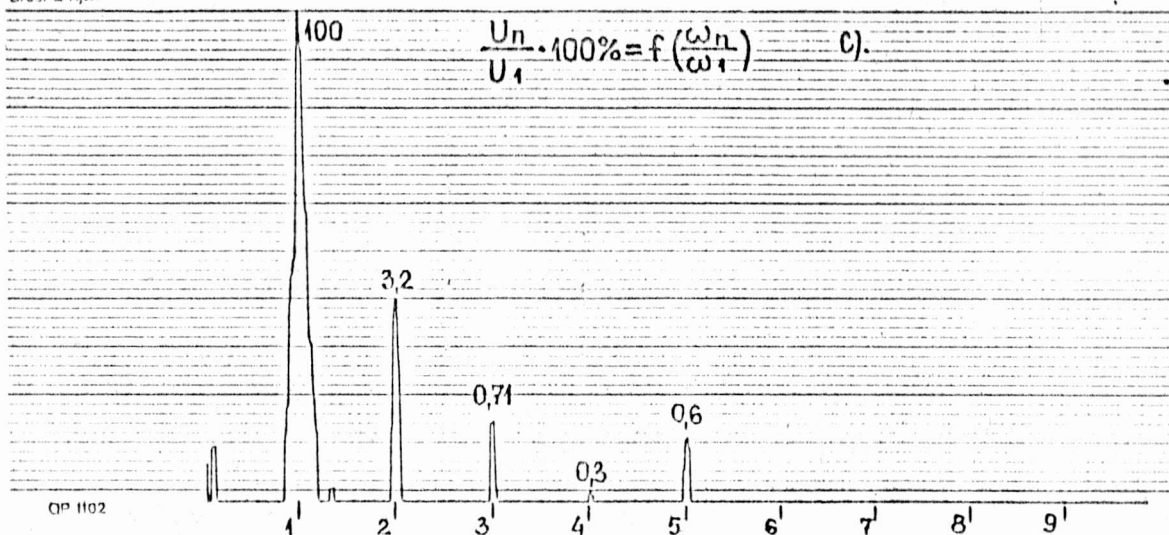
Rejestrogramy przedstawiono w tablicach od T1 do T34. Tablice T1 do T13 przedstawiają przebiegi oraz widma przebiegów prądów i napięć zasilających napęd MP-2 w Skolwinie, tablice T14 do T21 napęd MP-IV w Świeciu, tablice T22 do T27 napęd MP-V w Świeciu oraz tablice T28 i T29 napęd krajarki zwojów MP-IV w Świeciu. Dodatkowo w tablicach T30 do T34 przedstawiono obwiednie przebiegów składowych wąskopasmowych widma częstotliwościowego.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



T 1. Rozdzielnia AII - sekcja II szyn zbiorczych.

Transformator T7a, zasilający szafę tyrystorową nr 1 napędu MF-2.

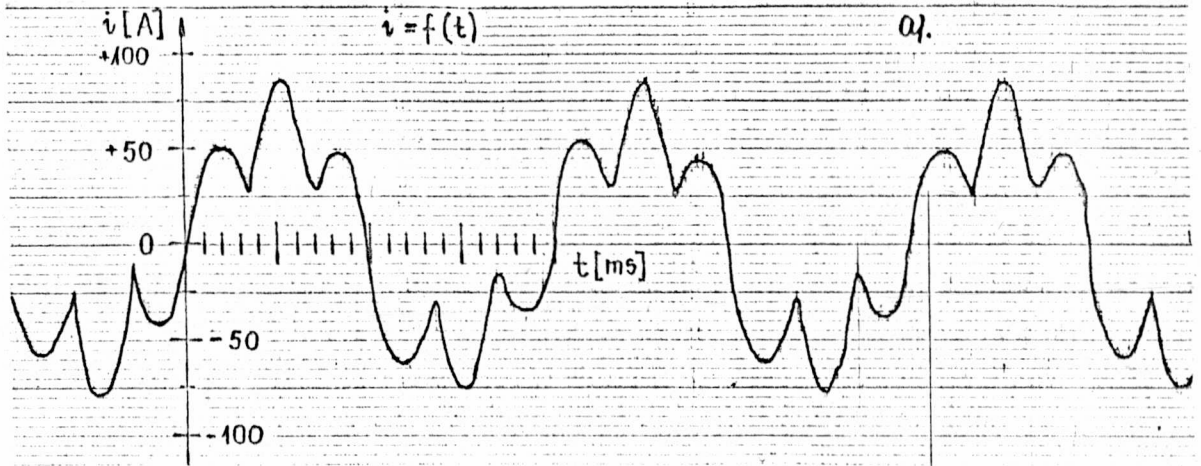
Napięcie skojarzone U_{RS} pierwotnej strony transformatora.

Wartości: $U_{RS} = 6000$ V, $U_{RS \text{ br.}} = 5500$ V, $U_{RS \text{ max +}} = 9200$ V, $U_{RS \text{ max -}} = 9200$ V.

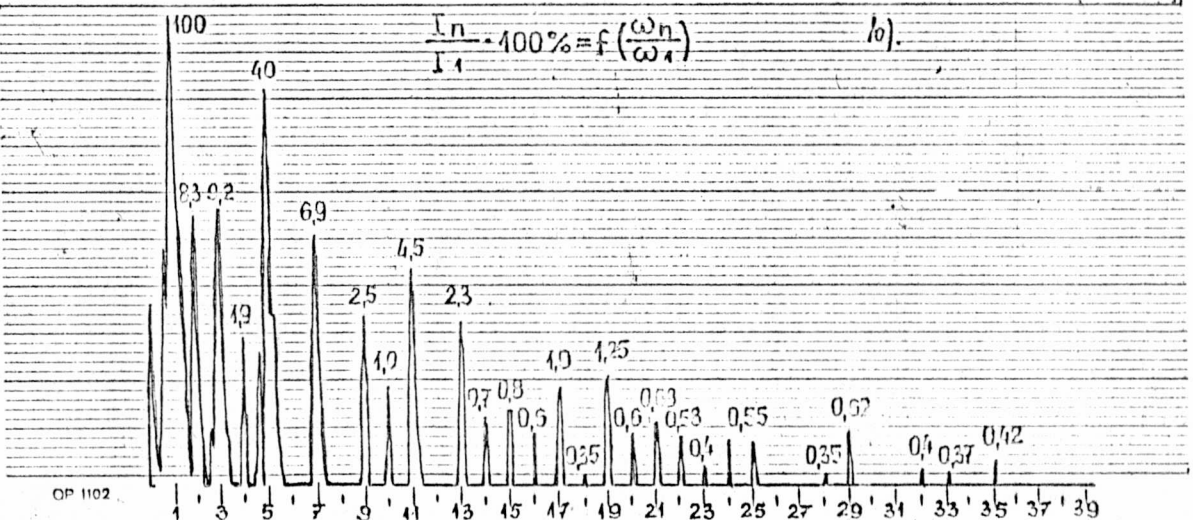
a/. przebieg czasowy napięcia U_{RS} ,

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 500 Hz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms,

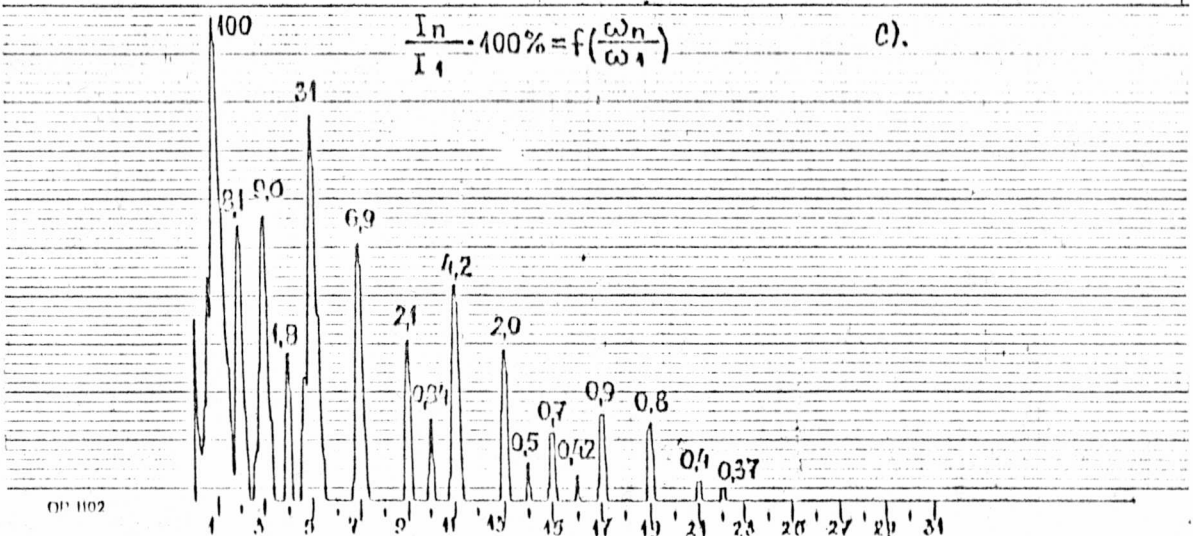
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 500 Hz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 115 ms.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



T 2. Rozdzielczość A11 - boki II szyn zbiorczych.

Transformator T7a, zasilający szafę tyrystorową nr 1 napędu MF-2.

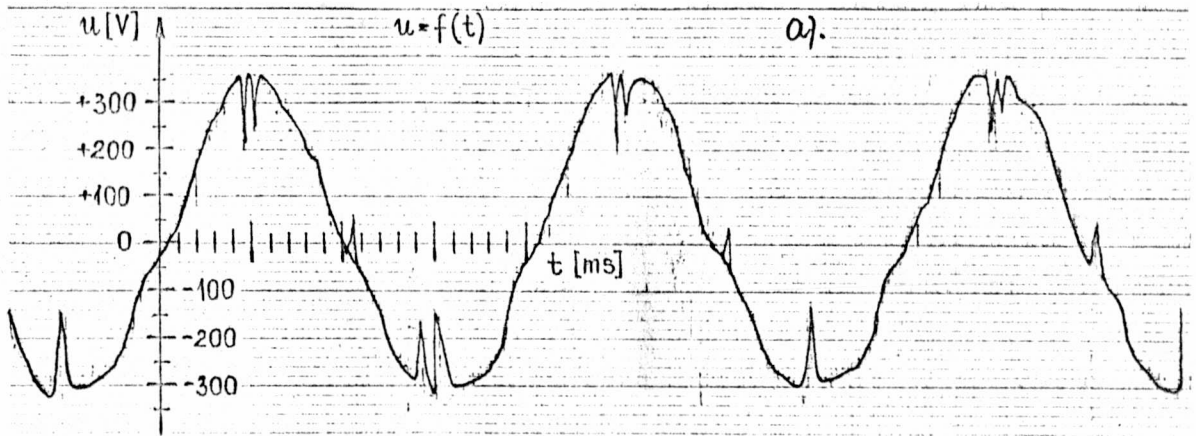
Prąd I_R pierwotnej strony transformatora.

Wartość skuteczna - $I_R = 46,6$ A, średnia - $I_R \text{ sr.} = 43$ A.

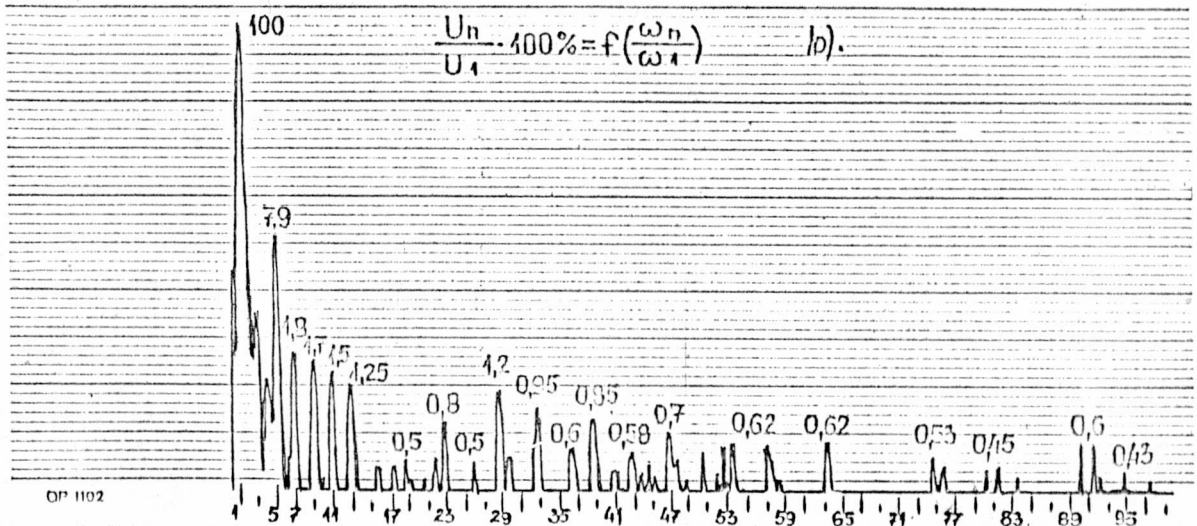
a/. przebieg czasowy prądu i_R .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms,

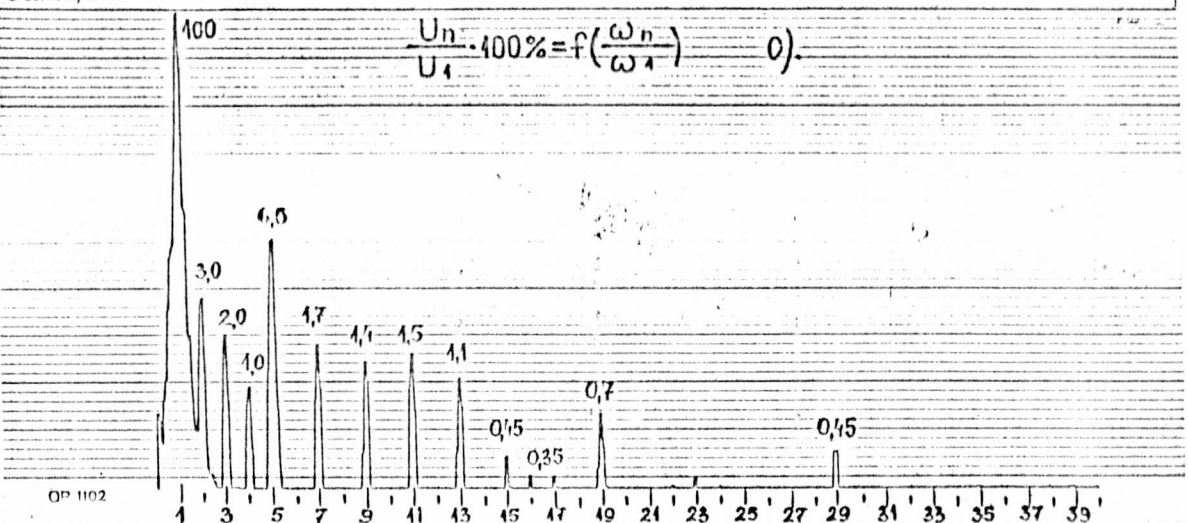
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 115 s.



Brüel & Kjør



Brüel & Kjør



T 3. Rozdzielnia AII - sekcja II szyn zbiorczych.

Transformator T7a, zasilający szafę tyrystorową nr 1 napędu MP-2.

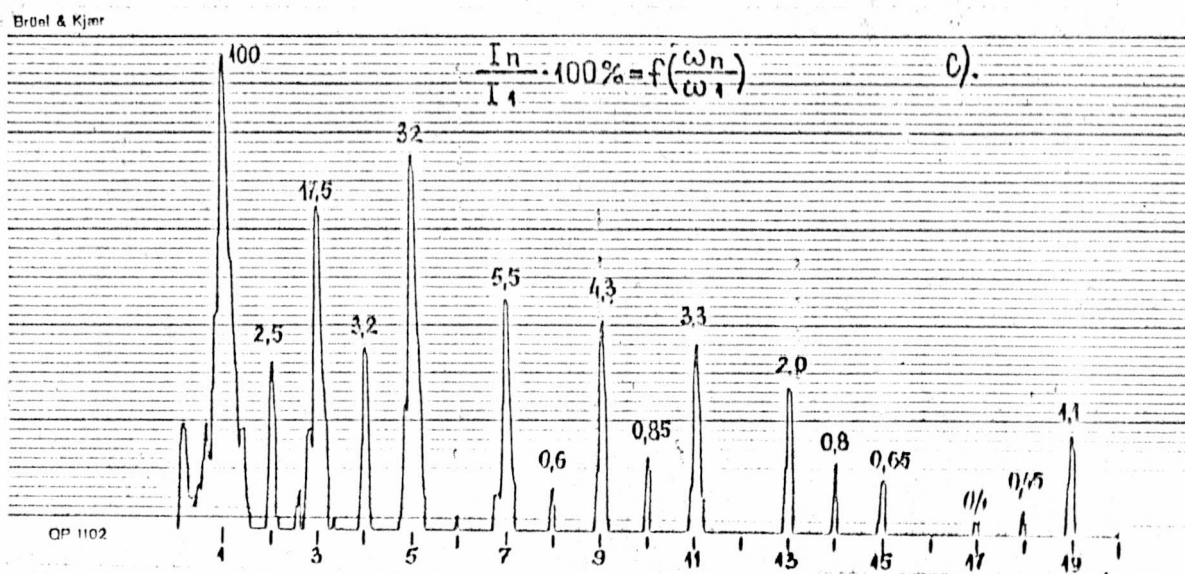
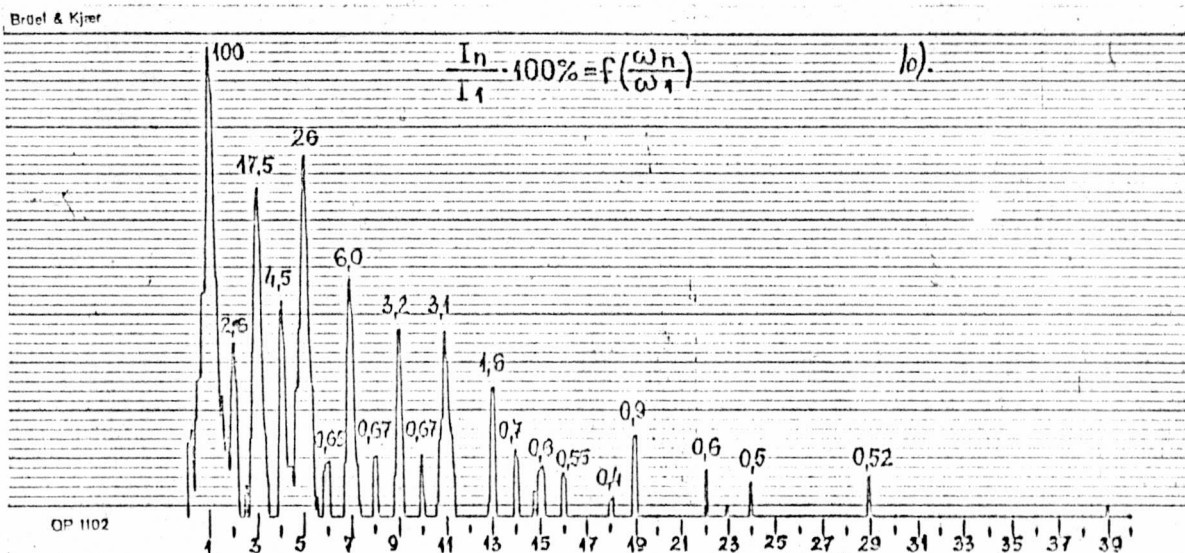
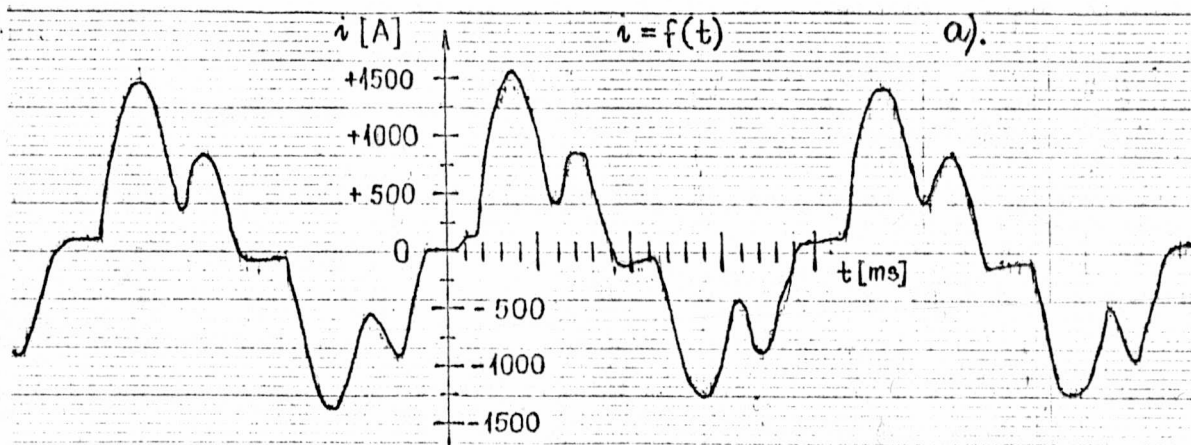
Napięcie fazowe U_{RO} wtórnej strony transformatora.

Wartości: $U_{RO} = 217 \text{ V}$, $U_{RO \text{ gr.}} = 195 \text{ V}$, $U_{RO \text{ max}} = 347 \text{ V}$, $U_{RO \text{ max.}} = 308 \text{ V}$.

a/. przebieg czasowy napięcia u_{RO} .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms,

c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 115 s.



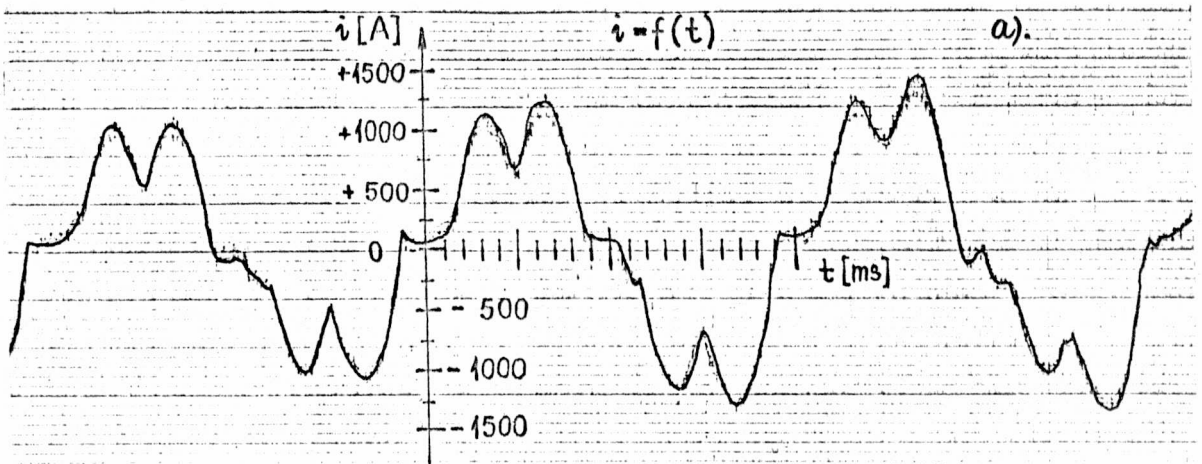
T 4. Rozdzielnia AII - sekcja II szyn zbiorczych.
 Transformator T7a, zasilający szafę tyrystorową nr 1 napędu MP-2.
 Prąd I_R wtórnej strony transformatora.

Wartości: skuteczna - $I_R = 725 A$, średnia - $I_R \text{ śr.} = 500 A$.

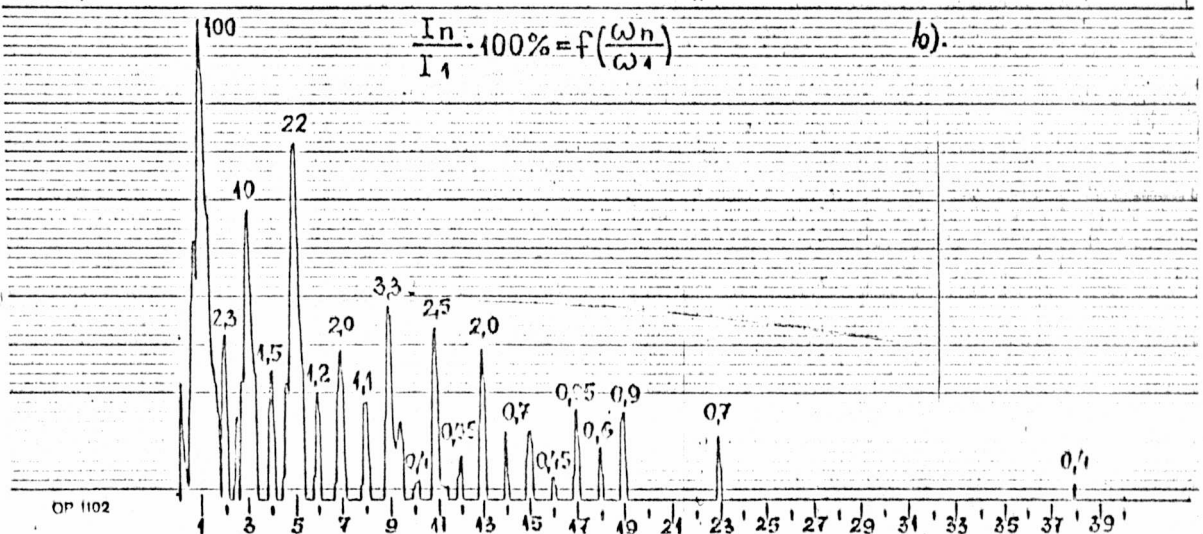
a/. przebieg czasowy prądu i_R .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednia-
 nia - 40 ms,

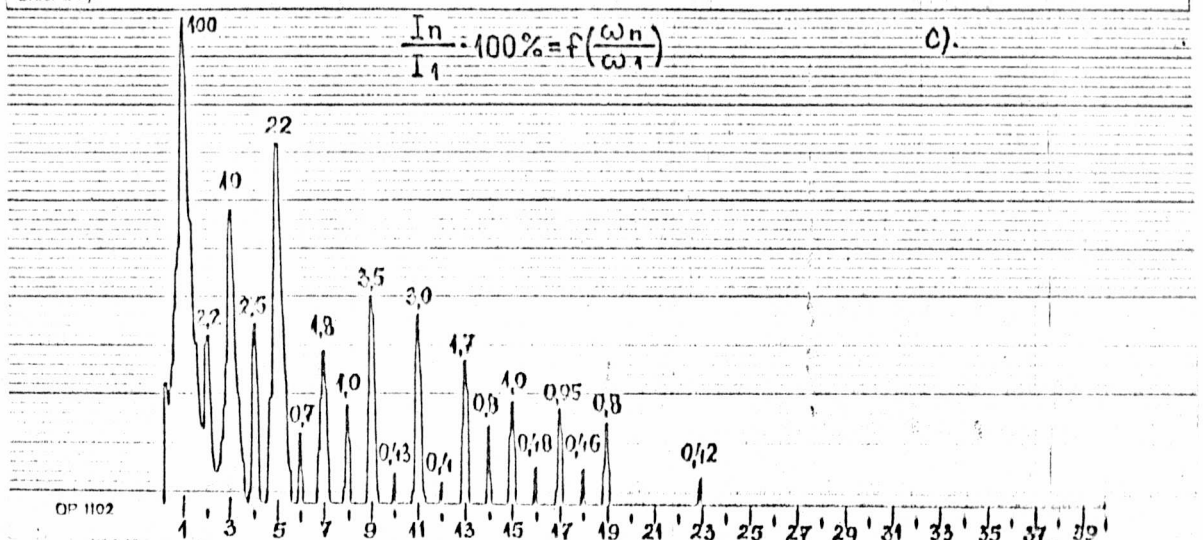
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 1 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednia-
 nia - 115 ms.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



T 5. Rozdzielnia AII - sekcja II szyn zbiorczych.

Transformator T7a, zasilający szafę tyrystorową nr 1 napędu MP-2.

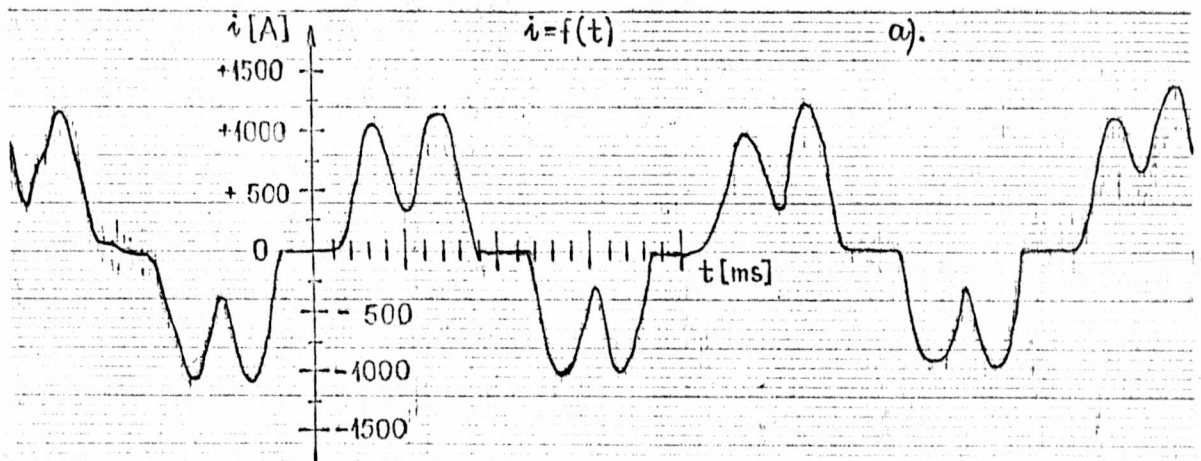
Prąd I_g wtórnej strony transformatora.

Wartości skuteczna - I_s - 780 A, średnia - I_s śr. - 650 A.

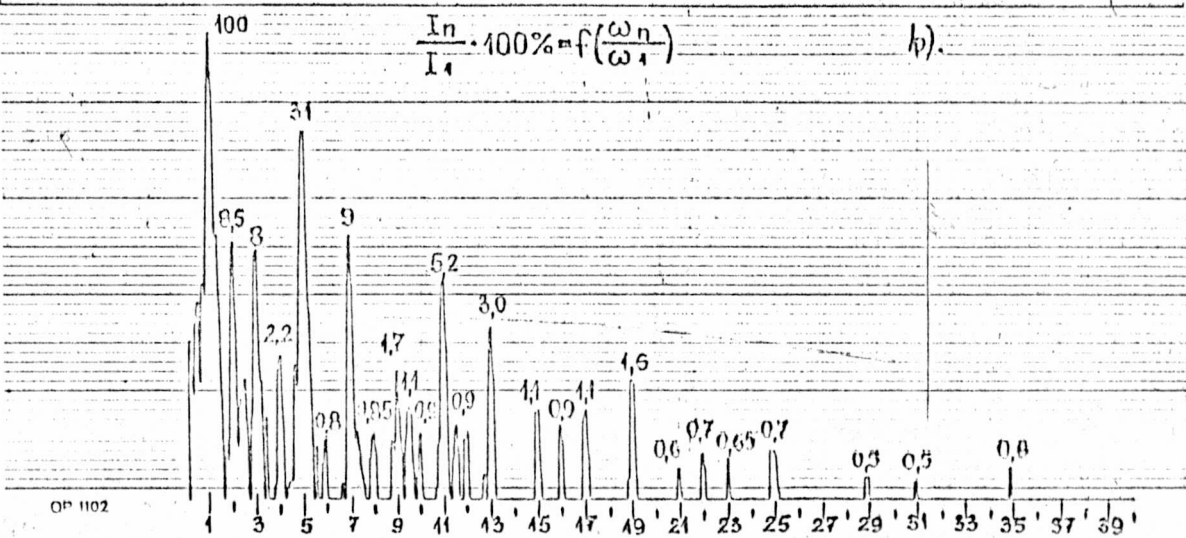
a/. przebieg czasowy prądu i_s .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms,

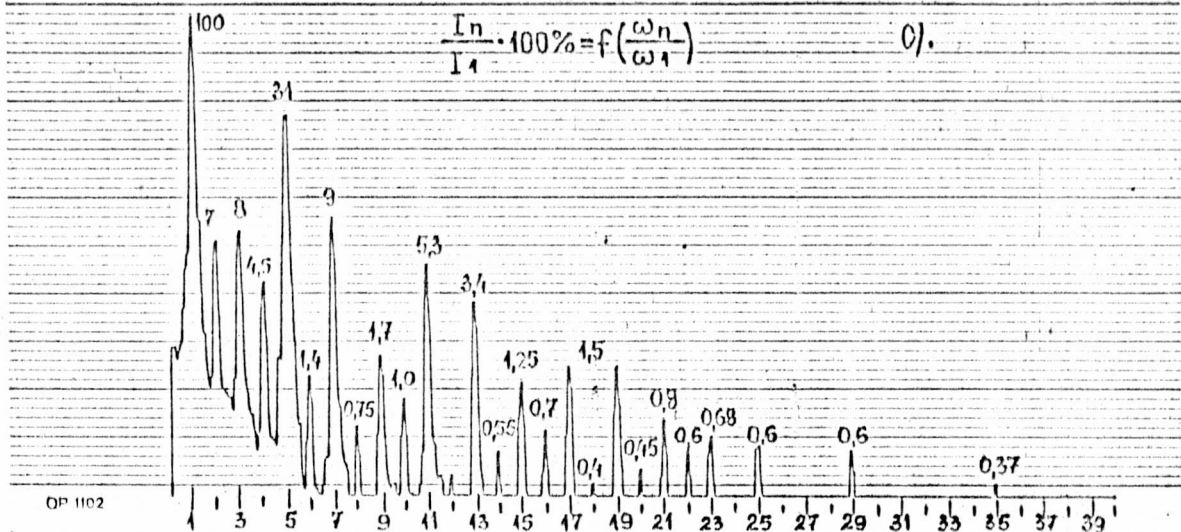
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 115 s.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



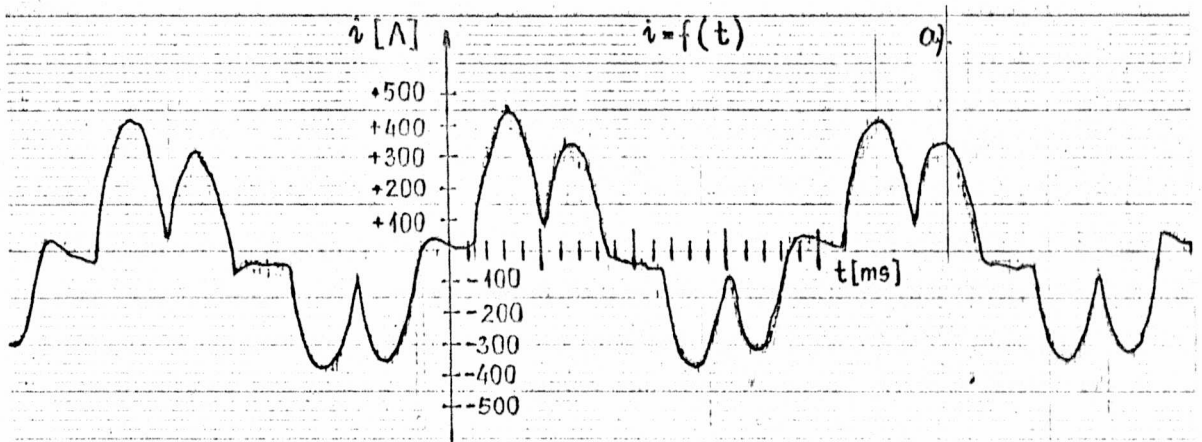
T 6. Rozdzielnia AII - sekcja II szyn zbiorczych.
Transformator T7a, zasilający szafę tyrystorową nr 1 napędu MP-2.
Prąd I_T wtórnej strony transformatora.

Wartości: skuteczna - $I_T = 600 A$, średnia - $I_{T \text{ 6r.}} = 480 A$.

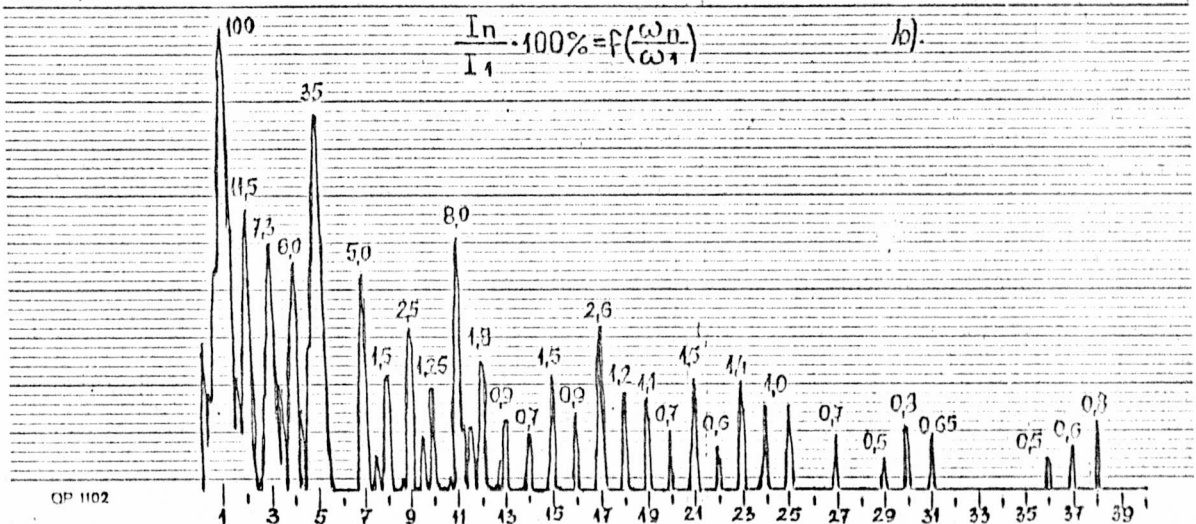
a/. przebieg chwilowy prądu i_m .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms,

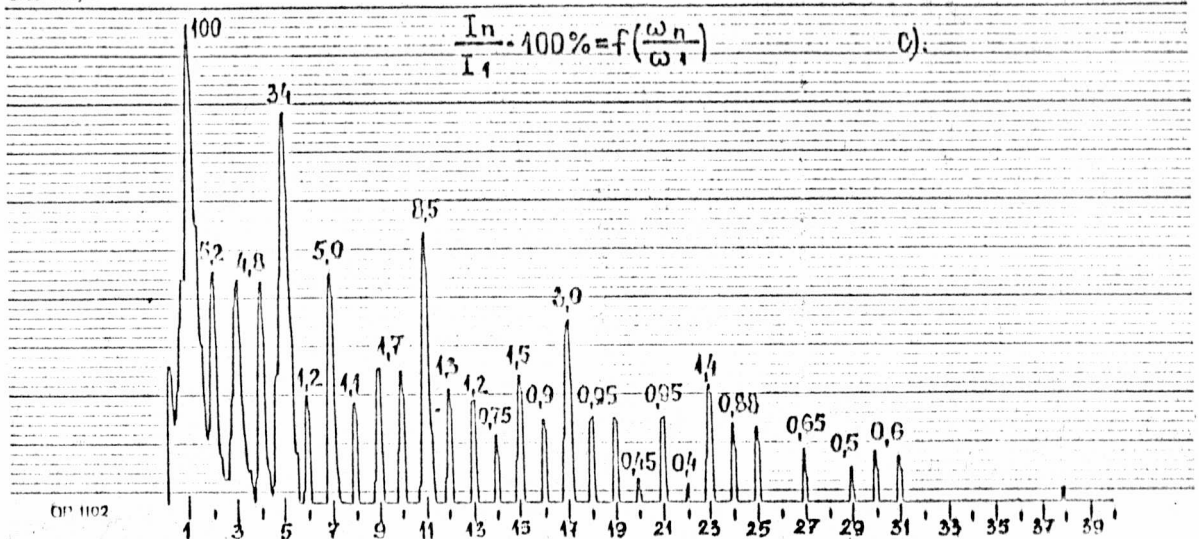
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 115 ms.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



T 7. Rozdzielnia AII. Szafa tyrystorowa nr 1 napędu MP-2.

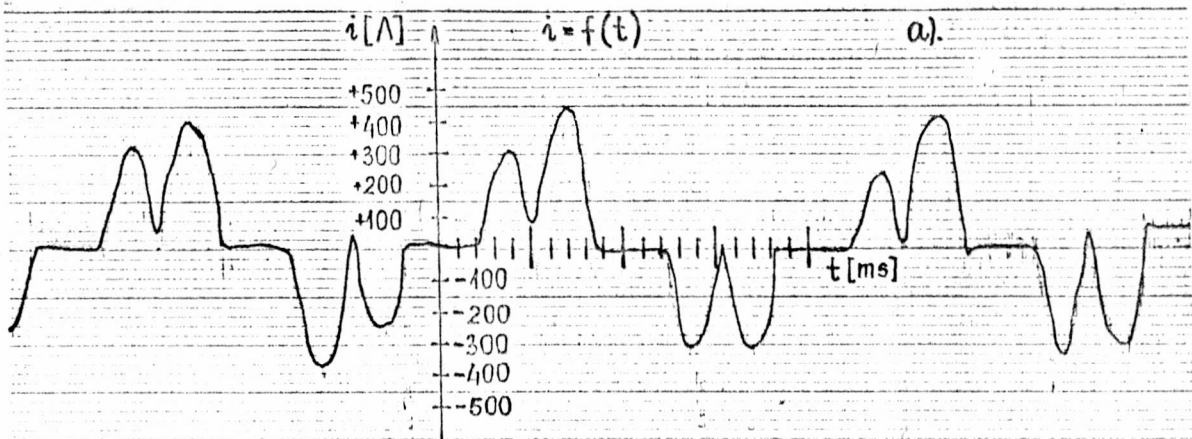
Prąd i_R zasilania PANT1-500/1 napędu sila.

Wartości: skuteczna - $I_R = 200 A$, średnia - $I_R \text{ śr.} = 167 A$.

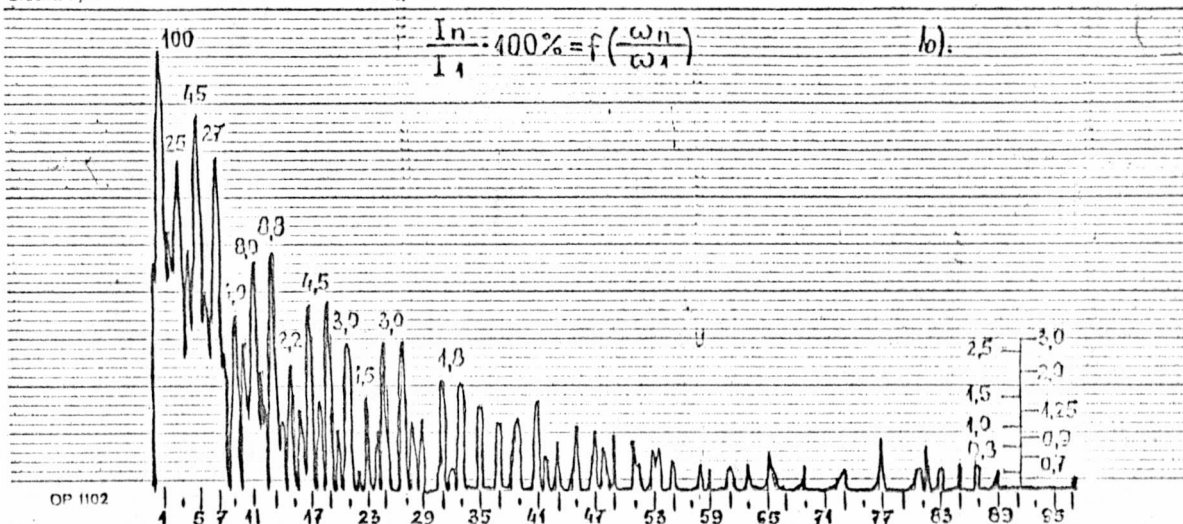
a/. przebieg czasowy prądu i_R .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, szum uśredniona - 40 mA,

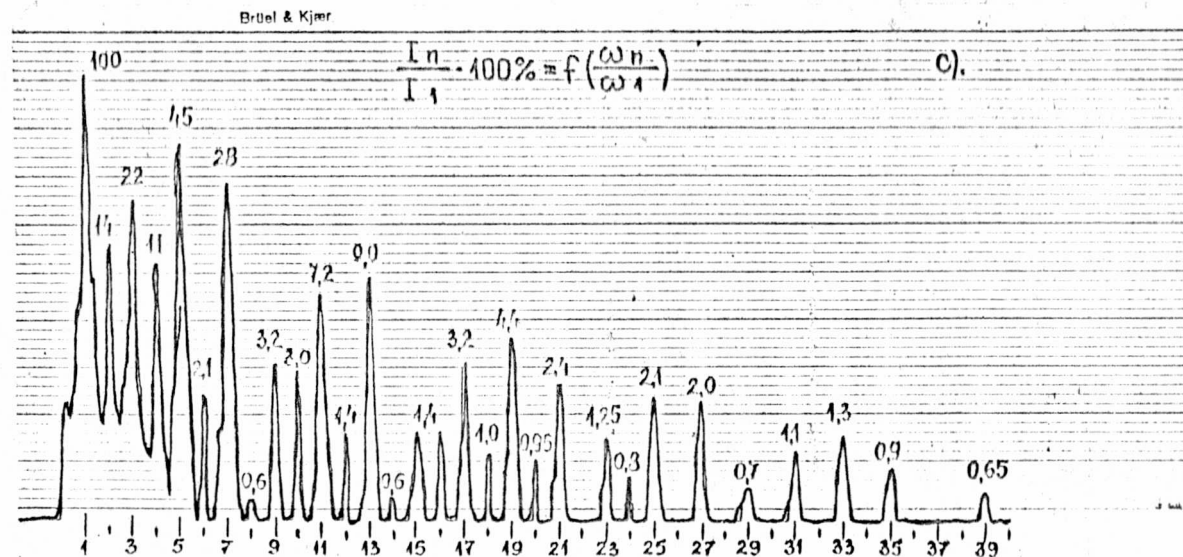
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, szum uśredniona - 115 mA.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



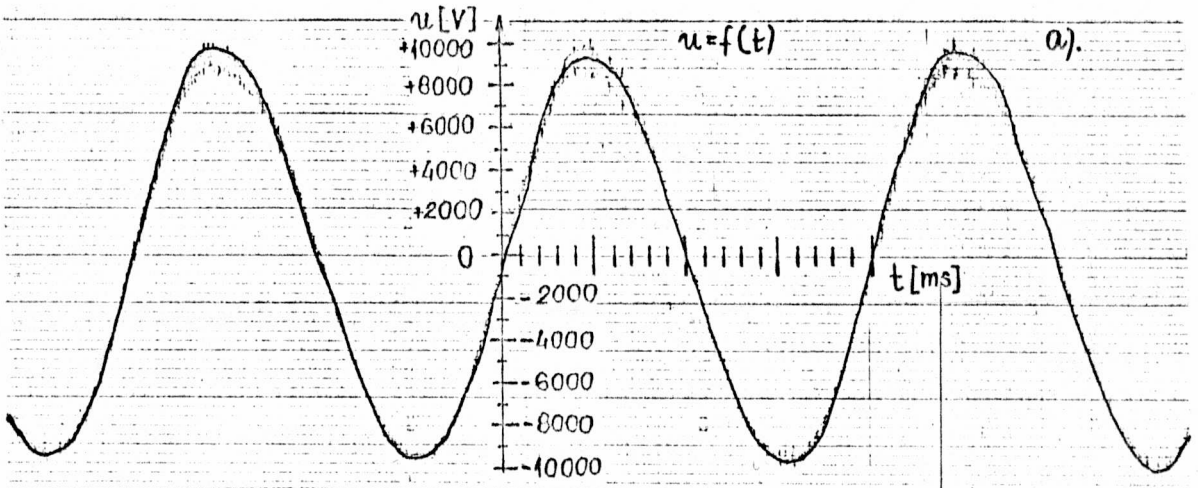
T 8. Rozdzielnia AII. Szafa tyrystorowa nr 1 napędu MP-2.

Prąd I_R zasilania PANT1-500/1 napędów I i II pracy.

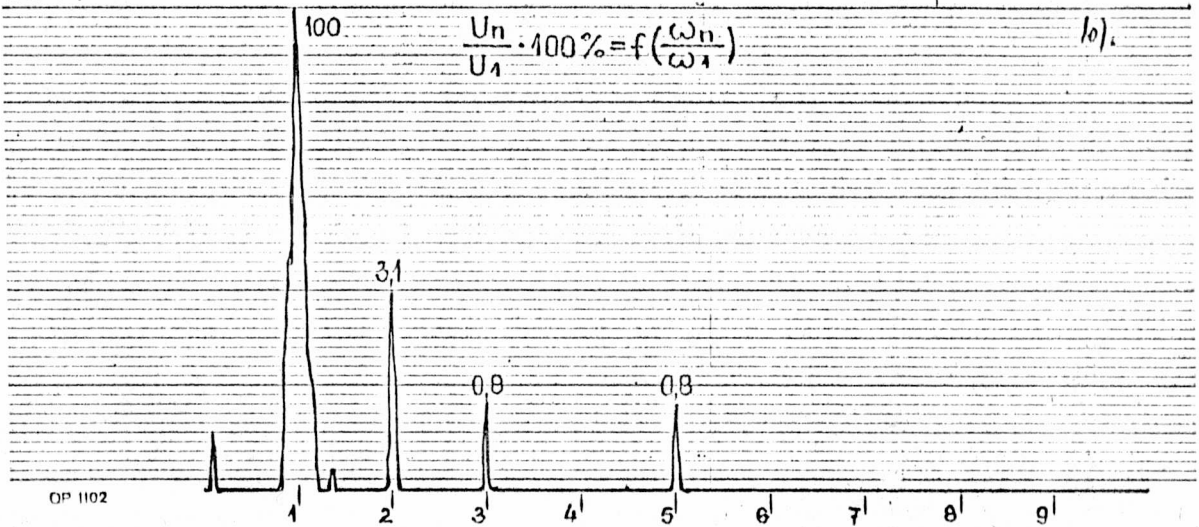
Wartości skuteczna - $I_R = 160$ A, średnia - $I_R \text{ śr.} = 120$ A.

a/ przebieg prądu $i(t)$ przy $f = 50$ Hz, dynamika = 50 dB, czuść uśredniona = 40 mV,

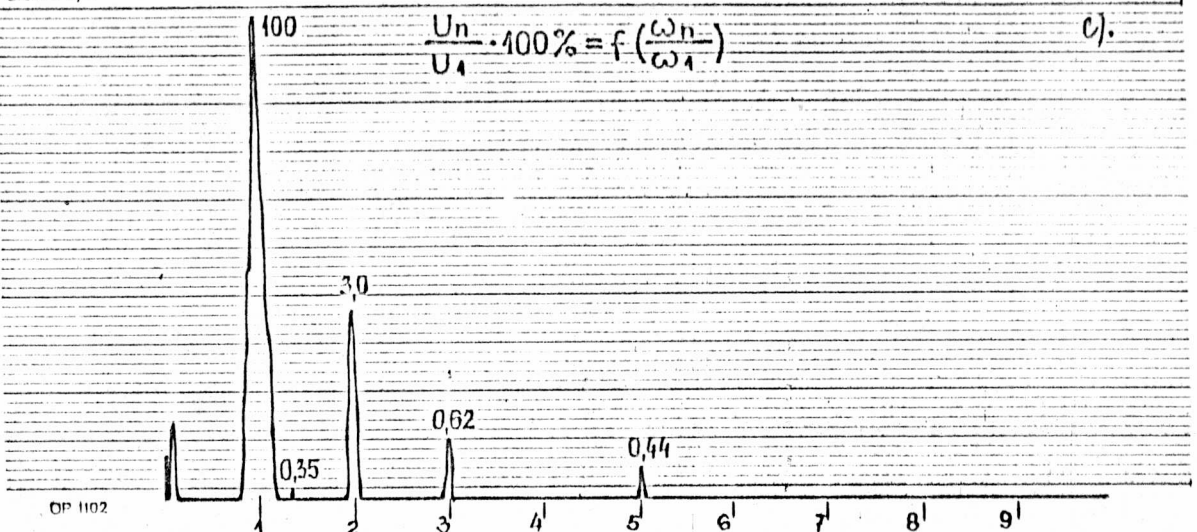
b/ widmo amplitudowo-częstotliwościowe prądu przy $f = 2$ kHz, dynamika = 50 dB, czuść uśredniona = 115 μ V.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



T 9. Rozdzielnia AII - sekcja I szyn zbiorczych.

Transformator T7, zasilający szafę tyrystorową nr 2 napędu MP-2.

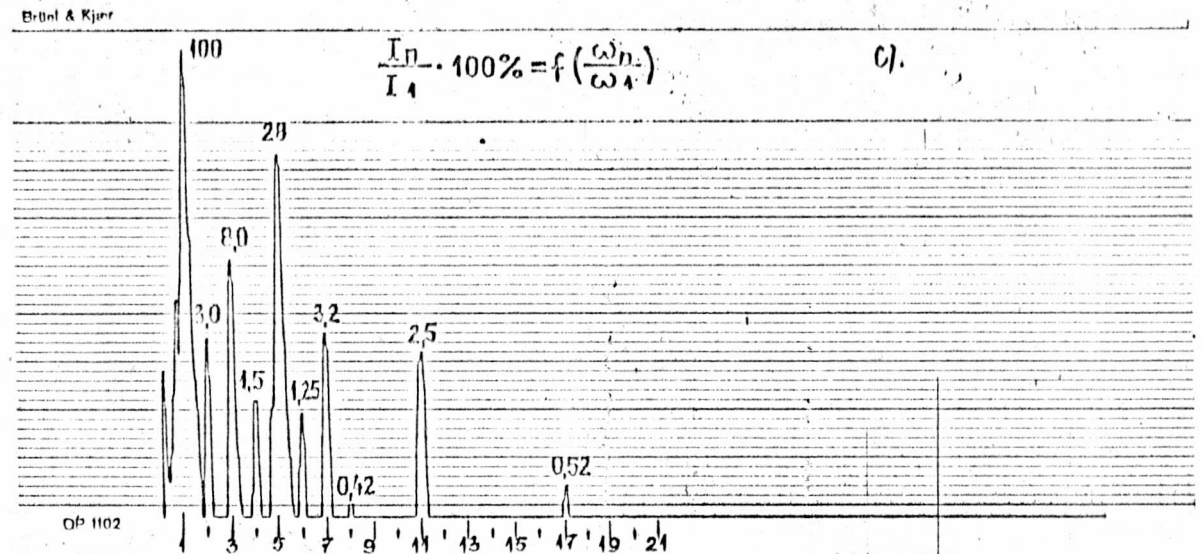
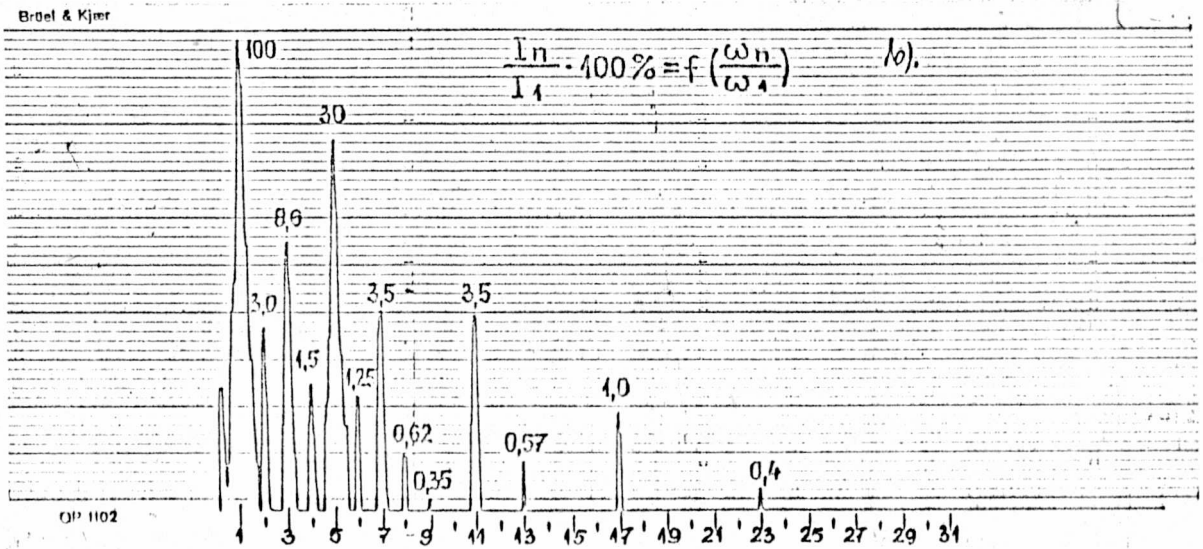
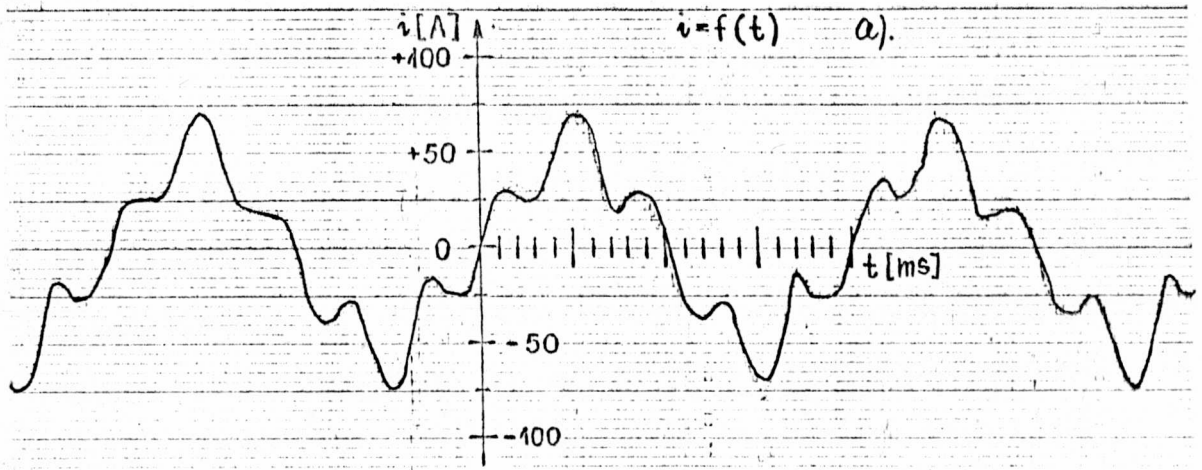
Napięcie okrojone U_{RS} pierwotnej strony transformatora.

Wartości: $U_{RS} = 6100$ V, $U_{RS} \text{ br.} = 5600$ V, $U_{RS \text{ max}} = 9300$ V, $U_{RS \text{ max}} = 9300$ V.

a/. przedbieg czasowy napięcia U_{RS} .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 500 Hz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms,

c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 500 Hz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 115 ms.



T 10. Rozdzielnia AII - oskeda I czyn zbierczych.

Transformator T7, zasilający szafę tyrystorową nr 2 napędu MP-2.

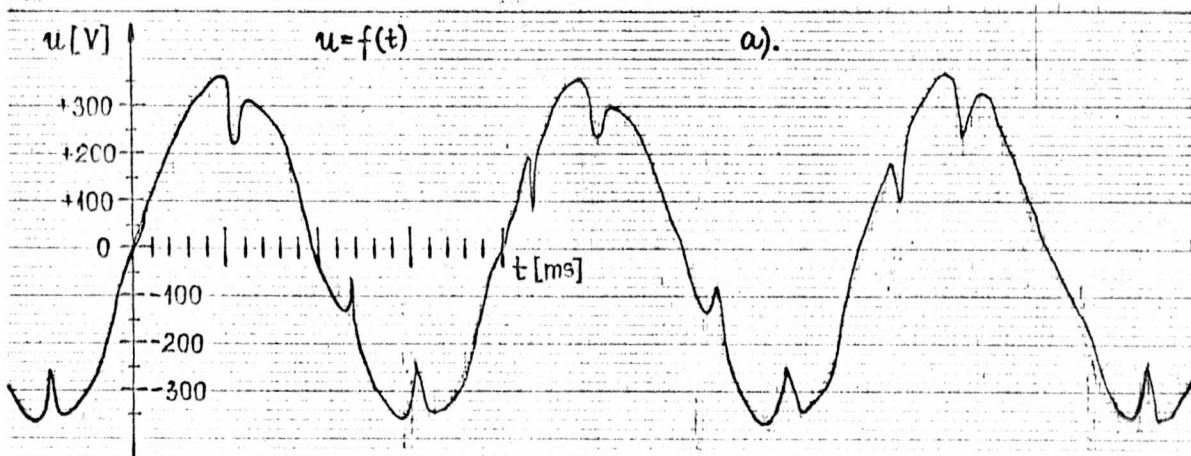
Prąd i_R pierwotnej strony transformatora.

Wartości: skuteczna - $I_R = 33 \text{ A}$, średnia - $I_R \text{ sr.} = 33,4 \text{ A}$.

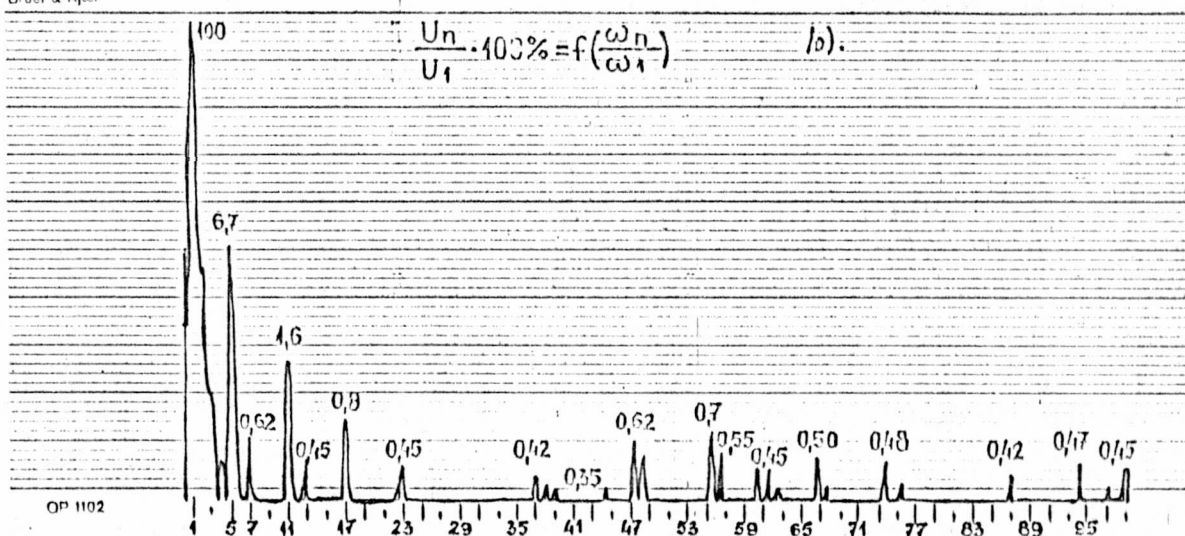
a/. przebieg czasowy prądu i_R .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednia-
nia - 40 ms,

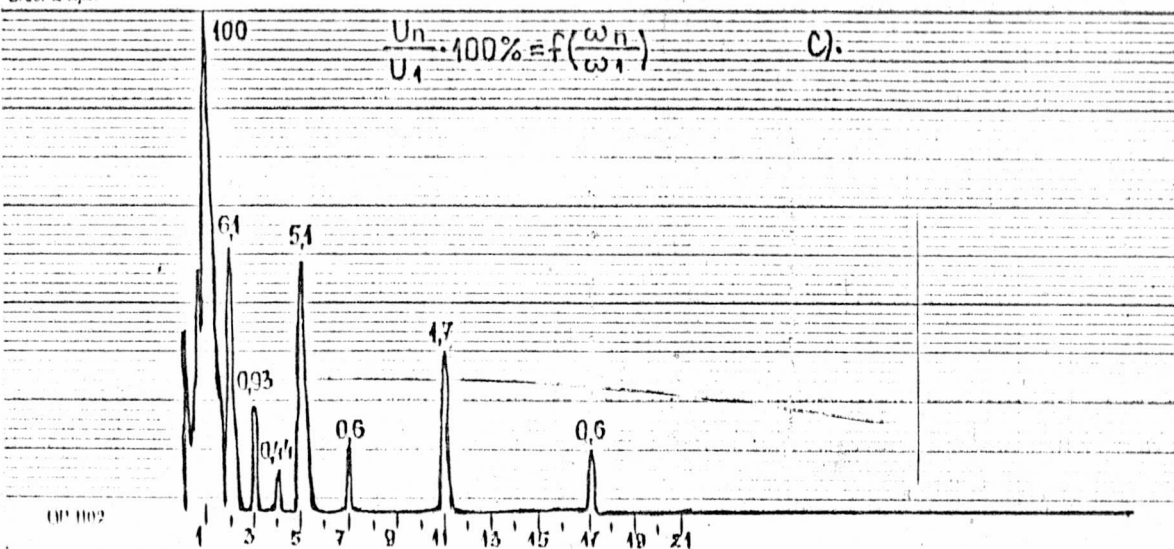
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednia-
nia - 115 s.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



T 11. Rozdzielnia AII - sekcja I szyn zbiorczych.

Transformator T7, zasilający szafę tyrystorową nr 2 napędu MP-2.

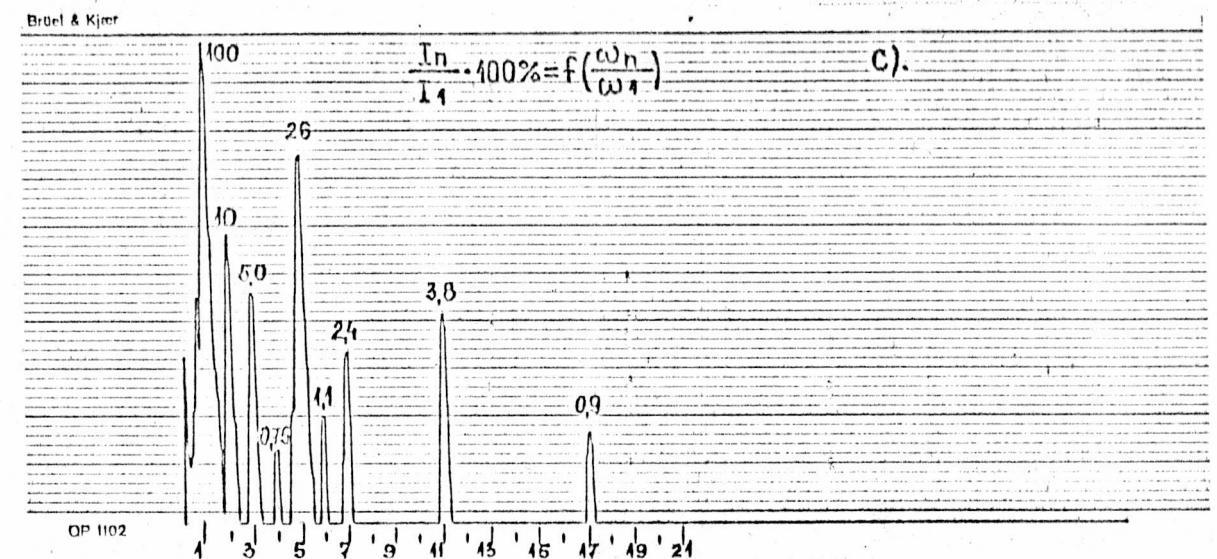
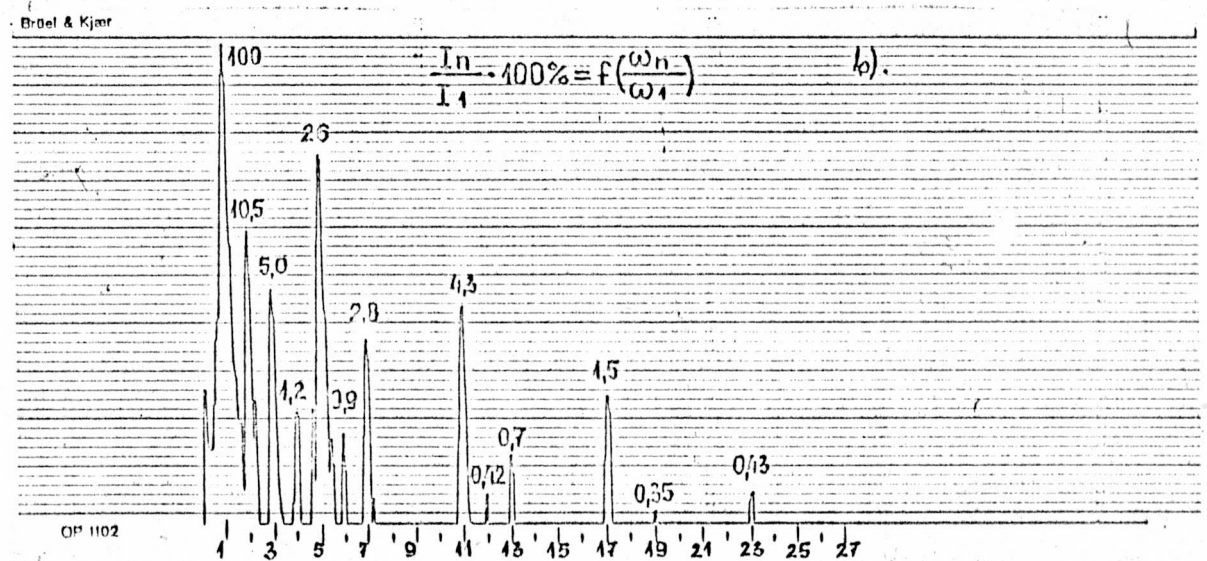
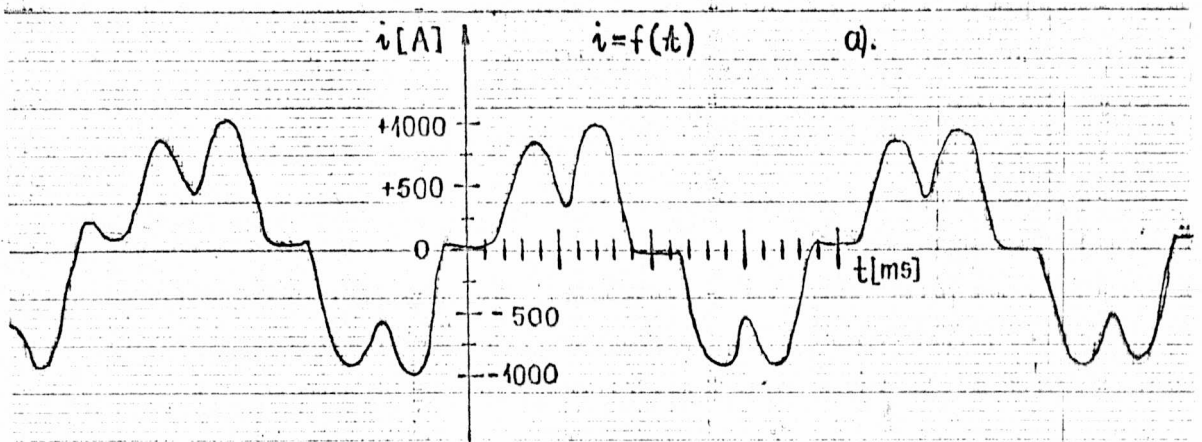
Napięcie fazowe U_{RO} wtórnej strony transformatora.

Wartości: $U_{RO}=224$ V, $U_{RO \text{ br.}}=198$ V, $U_{RO \text{ max+}}=346$ V, $U_{RO \text{ max-}}=346$ V.

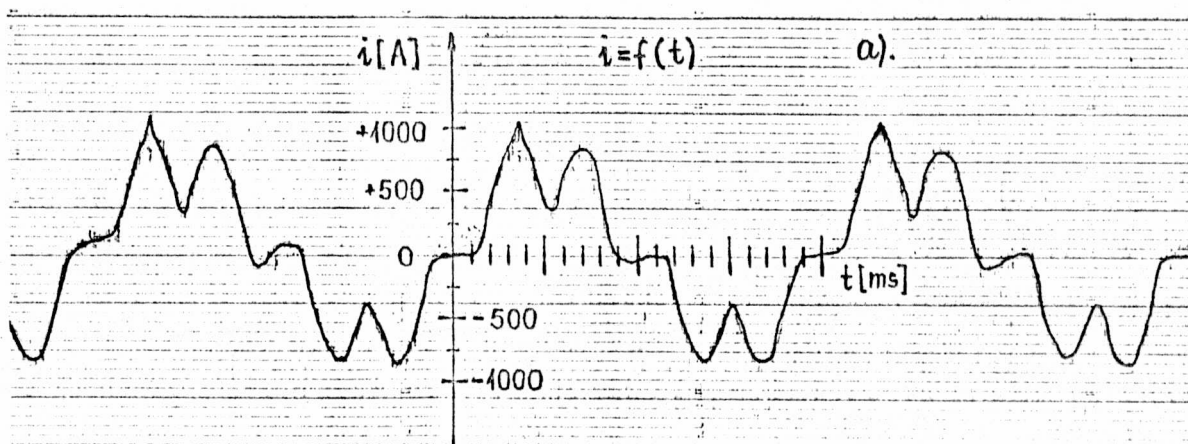
a/. przebieg czasowy napięcia u_{RO} .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms,

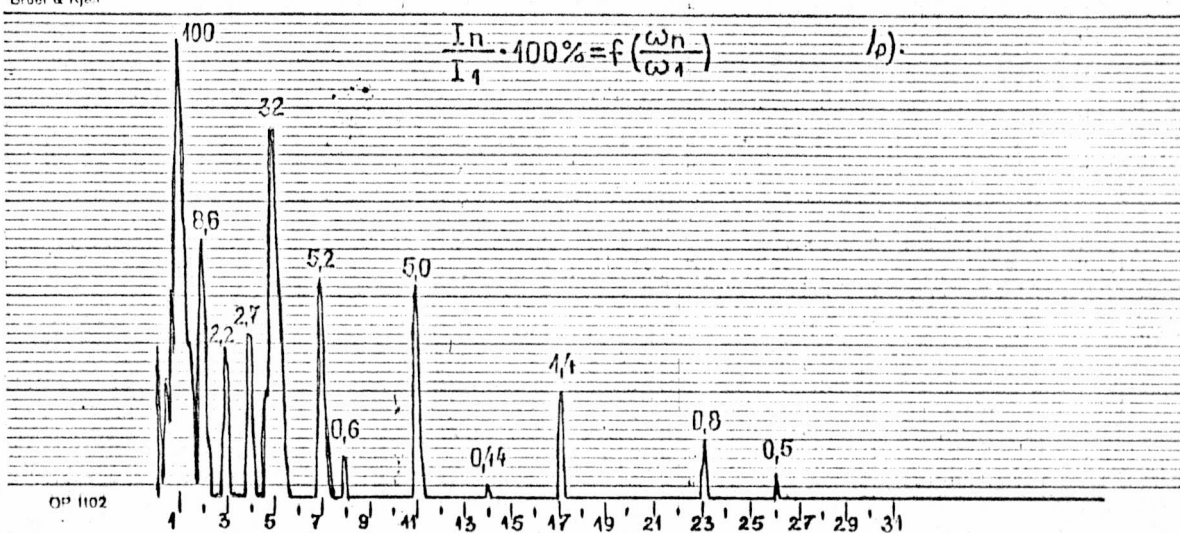
c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 115 s.



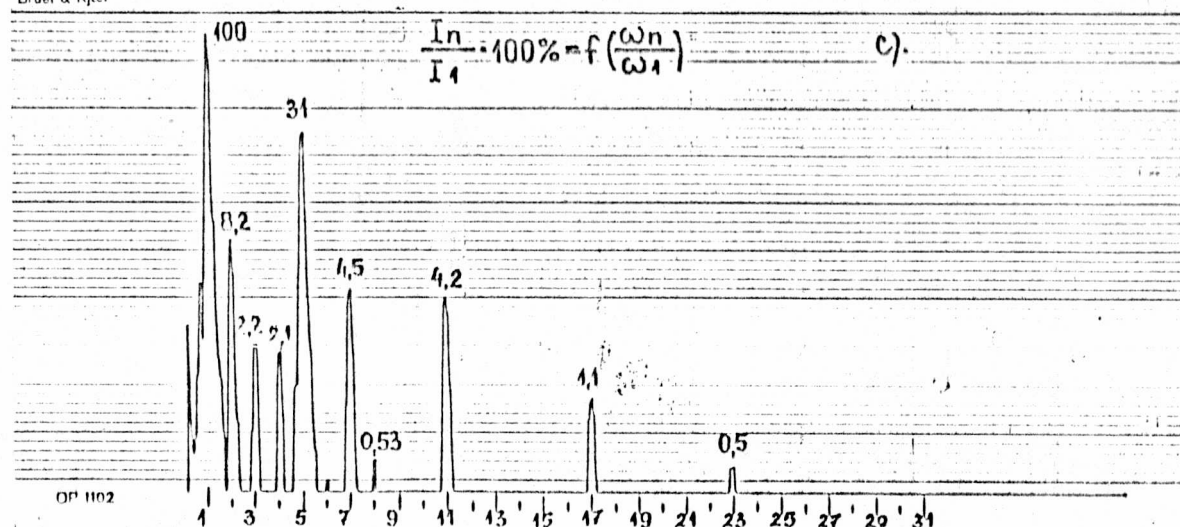
- T 12. Rozdzielnia AII - sekcja I szyn zbiorczych.
 Transformator T7, zasilający szafę tyrystorową nr 2 napędu MP-2.
 Prąd i_R wtórnej strony transformatora.
 Wartości: skuteczna - $I_R = 540$ A, średnia - $I_{R\text{ sr.}} = 450$ A.
 a/. przebieg czasowy prądu i_R ,
 b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednienia - 40 ms,
 c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednienia - 115 ms.



Brüel & Kjær



Brüel & Kjær



T 13. Rozdzielnia AII - sekcja I szyn zbiorczych.

Transformator T7, zasilający szafę tyrystorową nr 2 napędu MF-2.

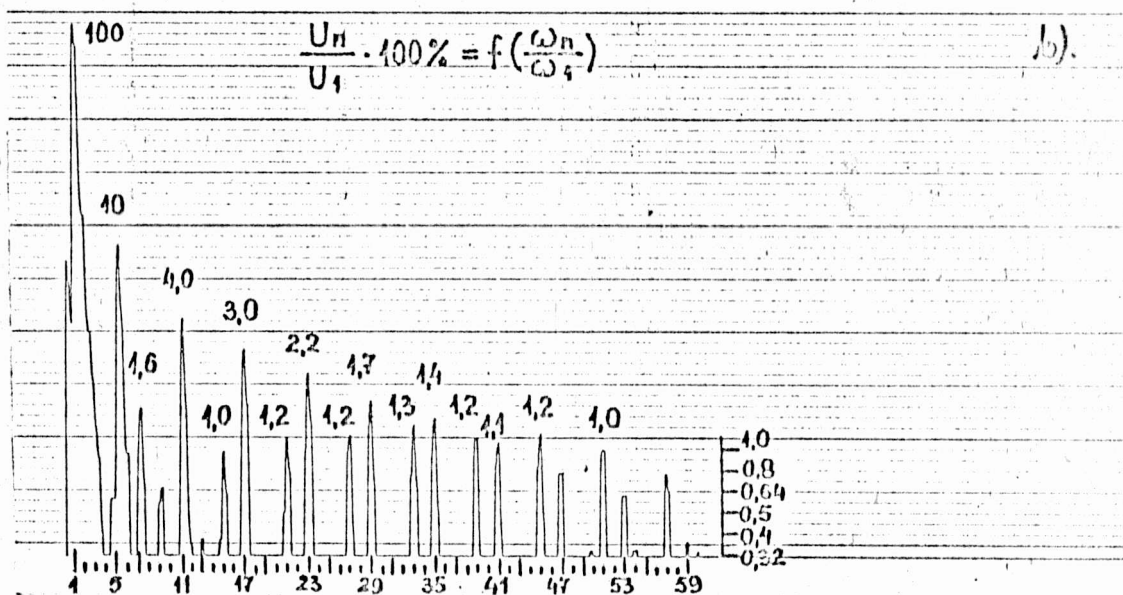
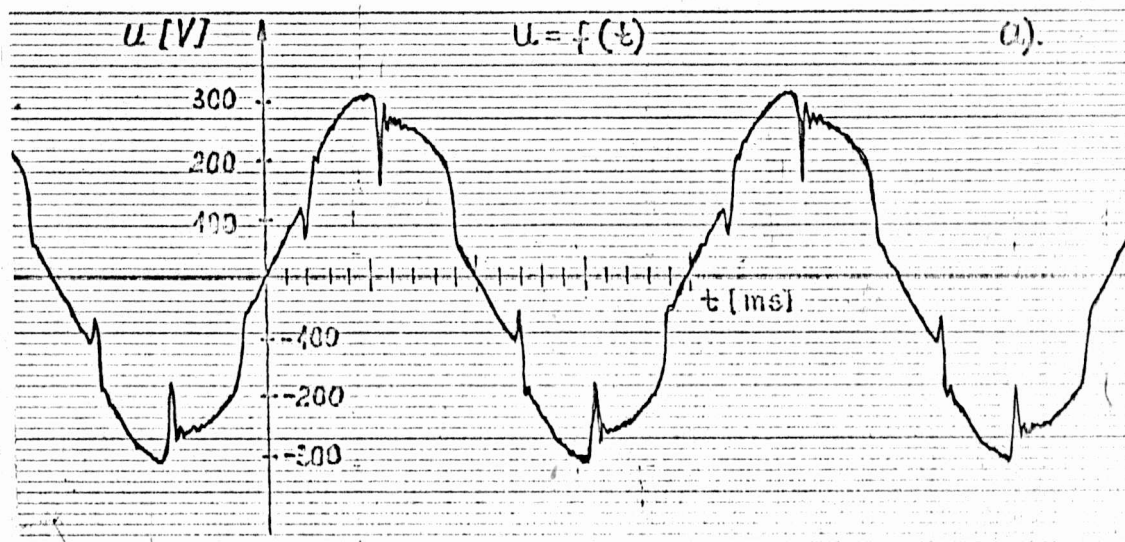
Prąd i_g wtórnej strony transformatora.

Wartości: skuteczna - $I_g = 500$ A, średnia - I_g śr. = 430 A.

a/. przebieg czasowy prądu i_g .

b/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednienia - 40 ms,

c/. widmo amplitudowo-częstotliwościowe: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśrednienia - 115 ms.



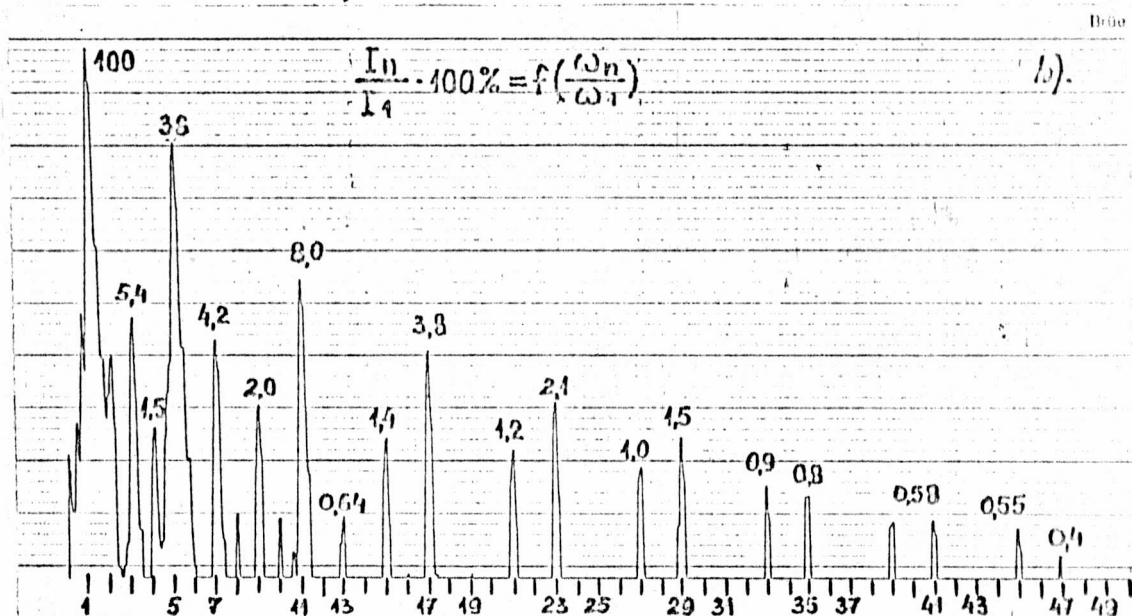
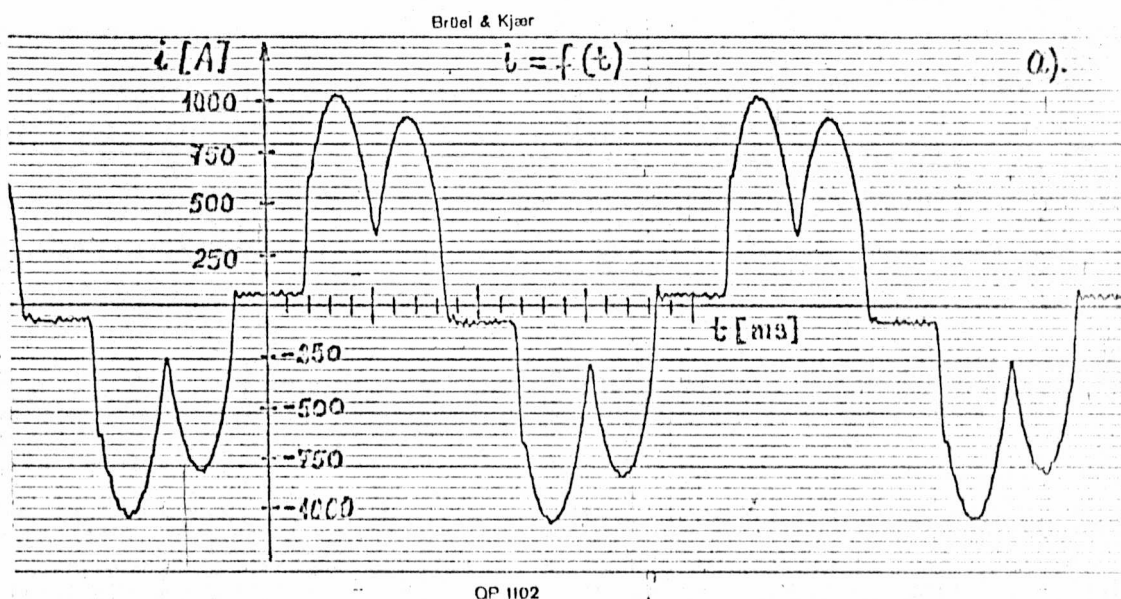
T.14. Rozdzielnia 0,4 kV napędu MP - 4. Szafa zasilająca I.

Napięcie fazowe u_{80} na szynach szafy I. Wartość skuteczna $U_{80} = 215$ V.

a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:

pasmo - 5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 91,8 s.



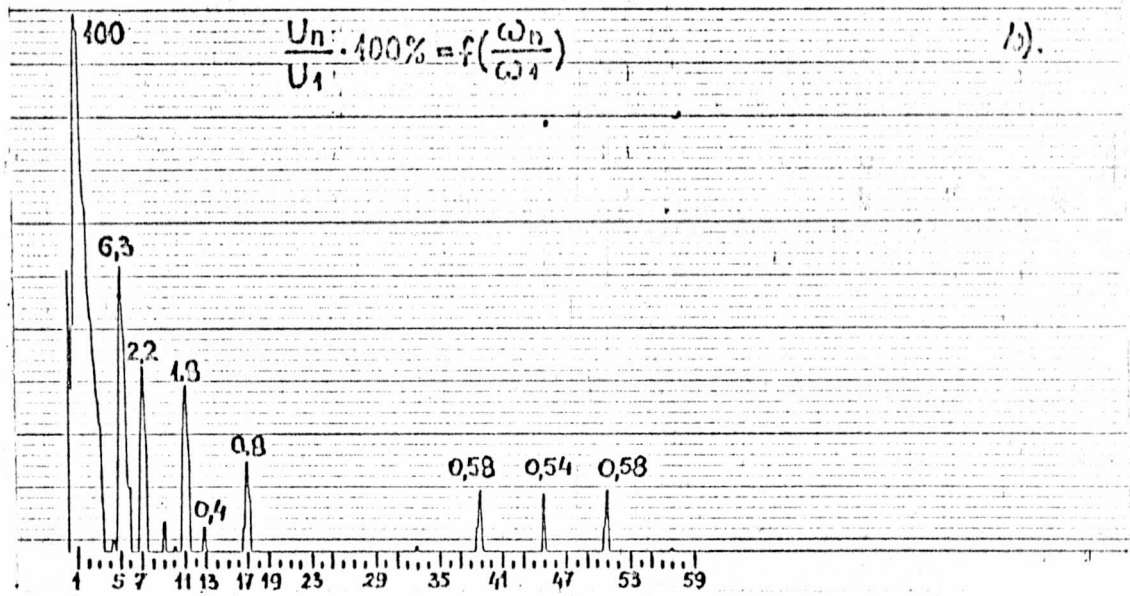
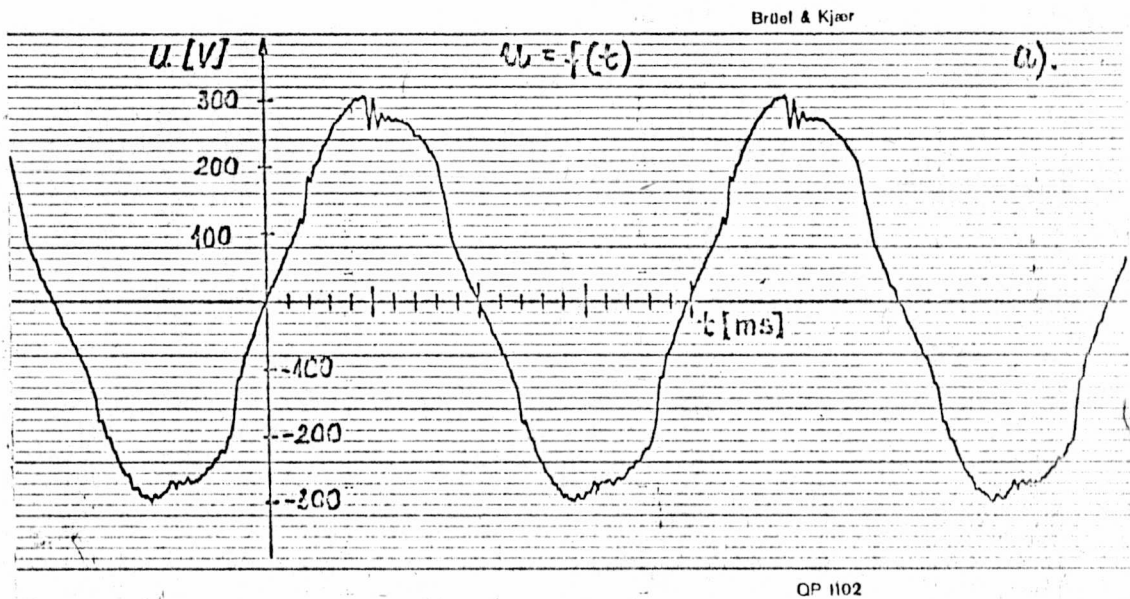
T.45. Rozdzielnia 0,4 kV napędu MP-4. Szafa zasilająca I.

Prąd i_B zasilania szafy I. Wartość skuteczna $I_B = 755$ A.

a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:

pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 183,6 s.



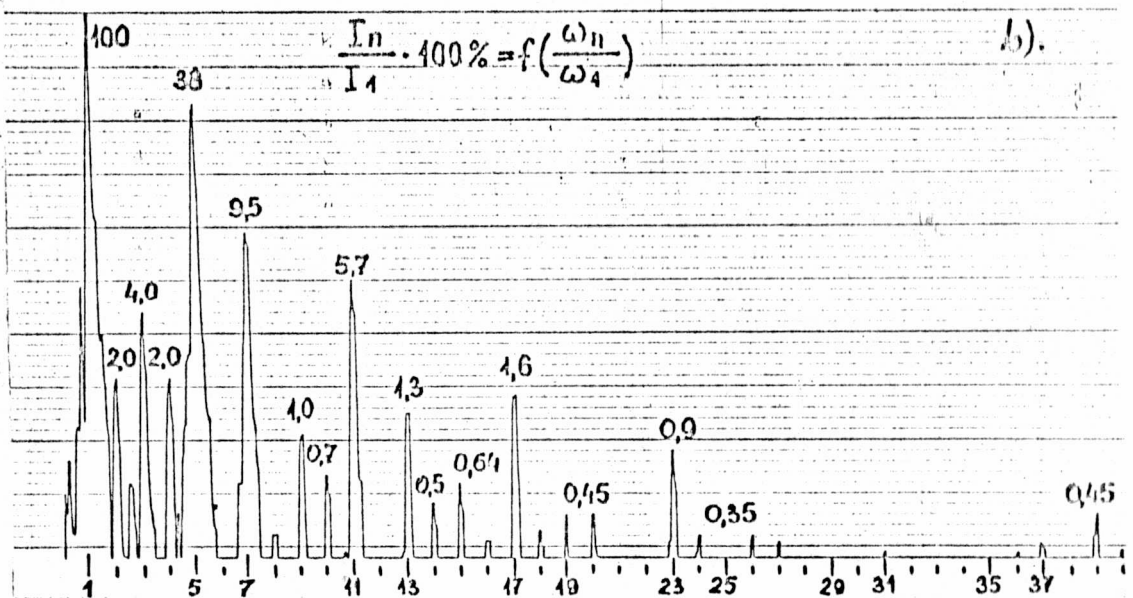
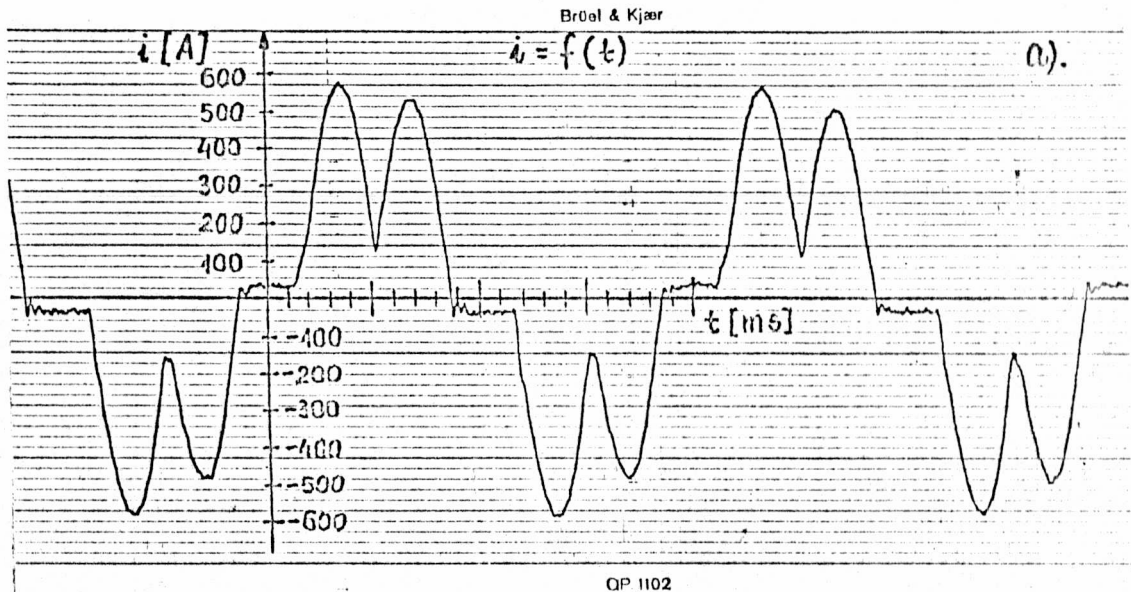
T.16. Rozdzielnia 0,4 kV napędu MP-4. Szafa zasilająca II.

Napięcie fazowe u_{BO} na szynach szafy II. Wartość skuteczna $U_{BO} = 215$ V.

a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:

pasmo - 5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 91,8 s.



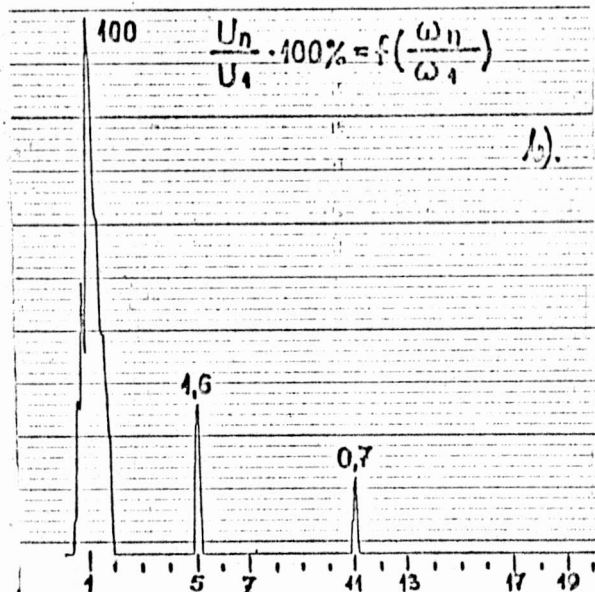
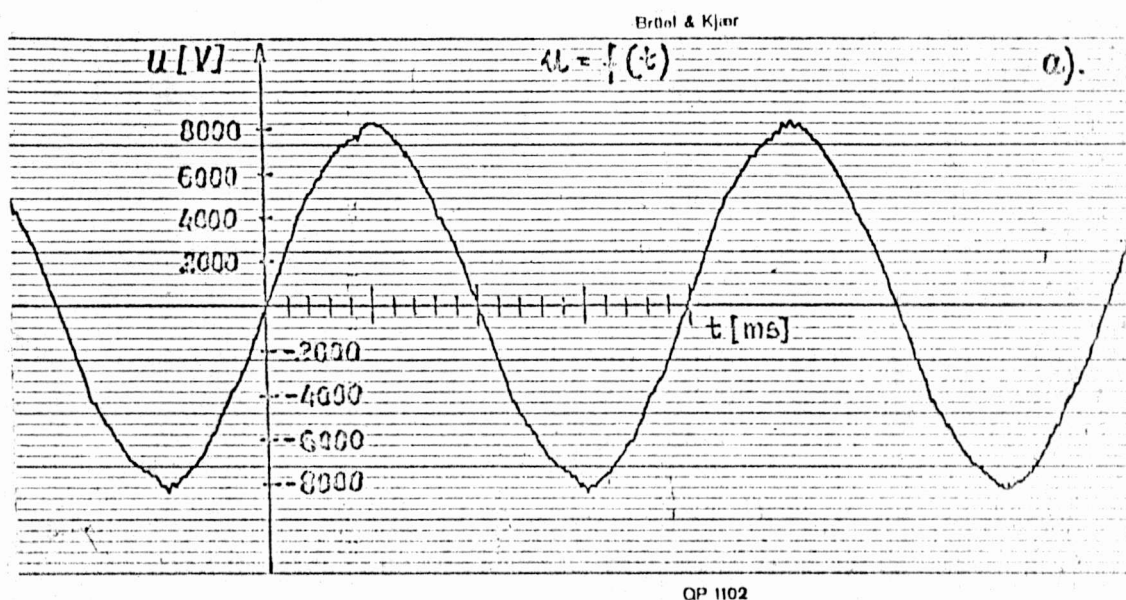
T.17. Rozdzielnia 0,4 kV napędu MP-4. Szafa zasilająca II.

Prąd I_B zasilania szafy II. Wartość skuteczna $I_B = 420$ A.

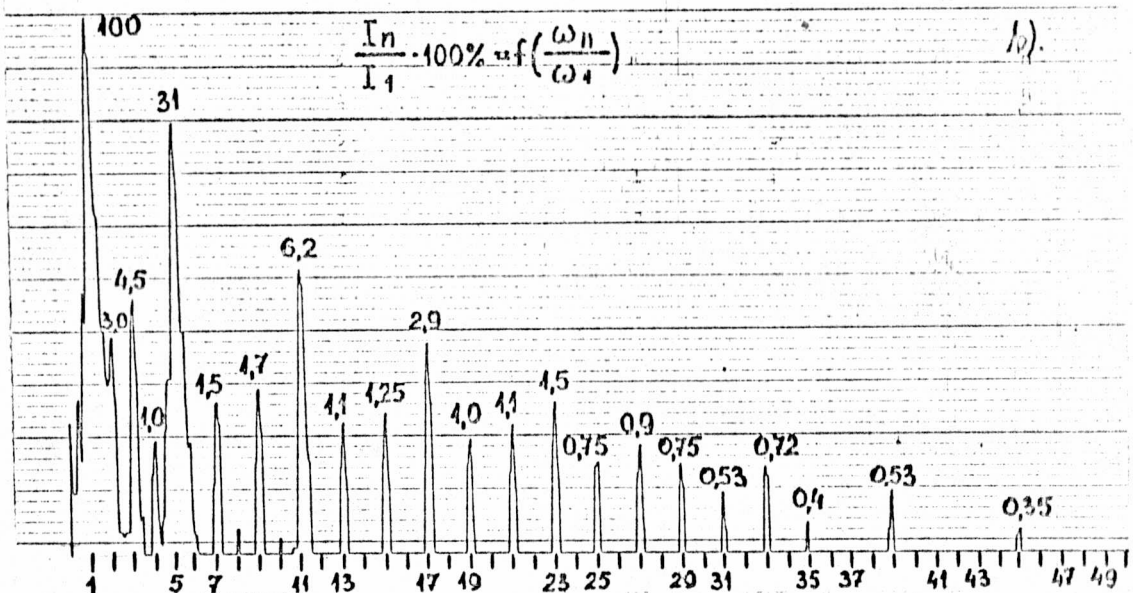
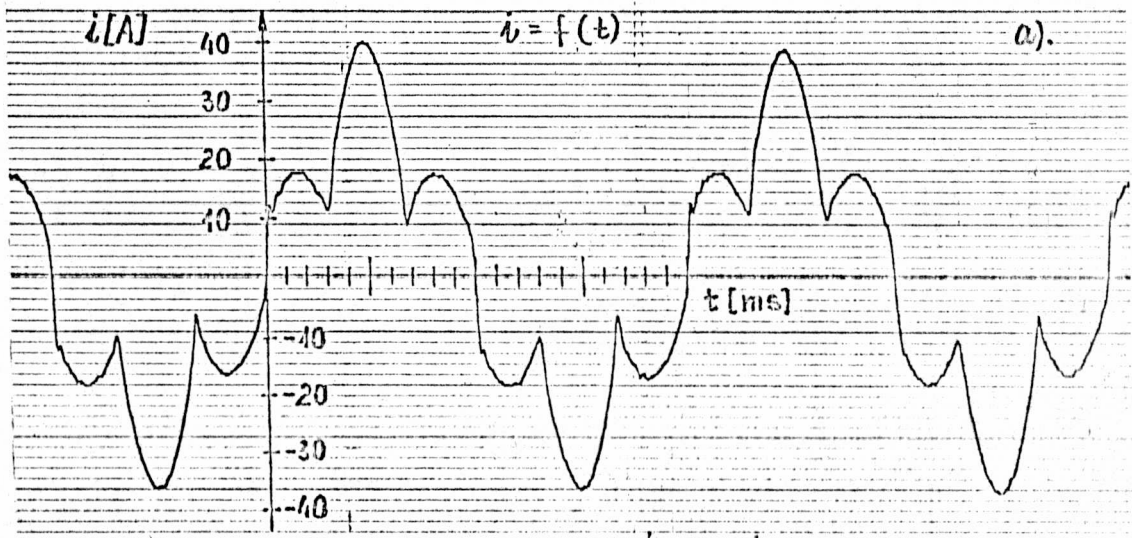
a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:

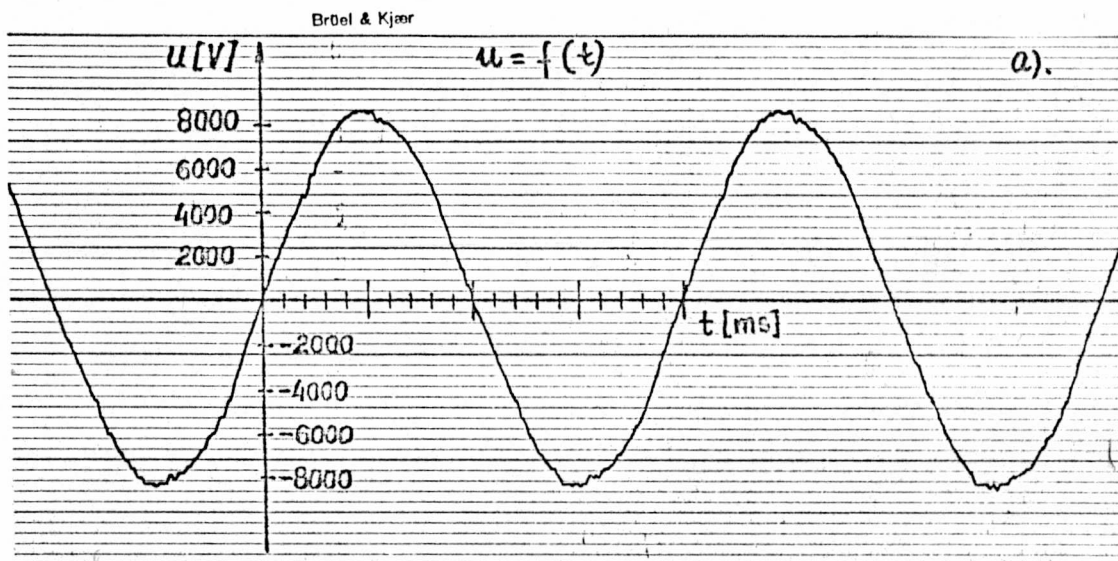
pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 57,3 s.



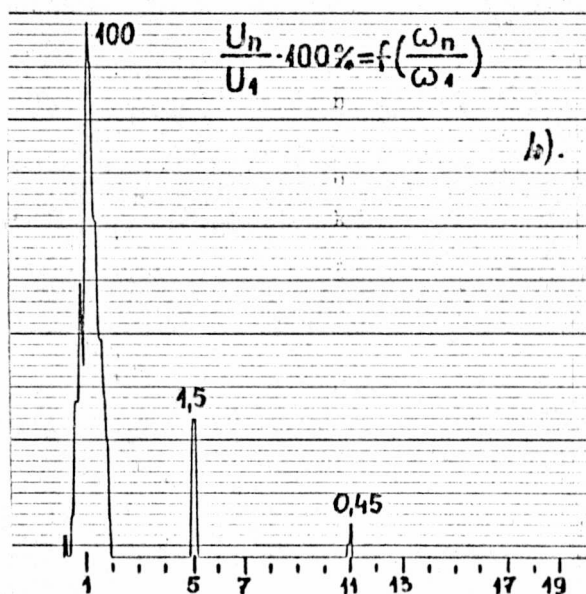
- T.48. STR - 15/2 : rozdzielnia 6 kV. Transformator T-1 zasilający szafę I napędu MP-4.
 Napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach T-1 po stronie 6 kV.
 Wartość skuteczna $U_{RS} = 5,8$ kV.
 a/. przebieg wartości chwilowych,
 b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa :
 pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 57,3 s.



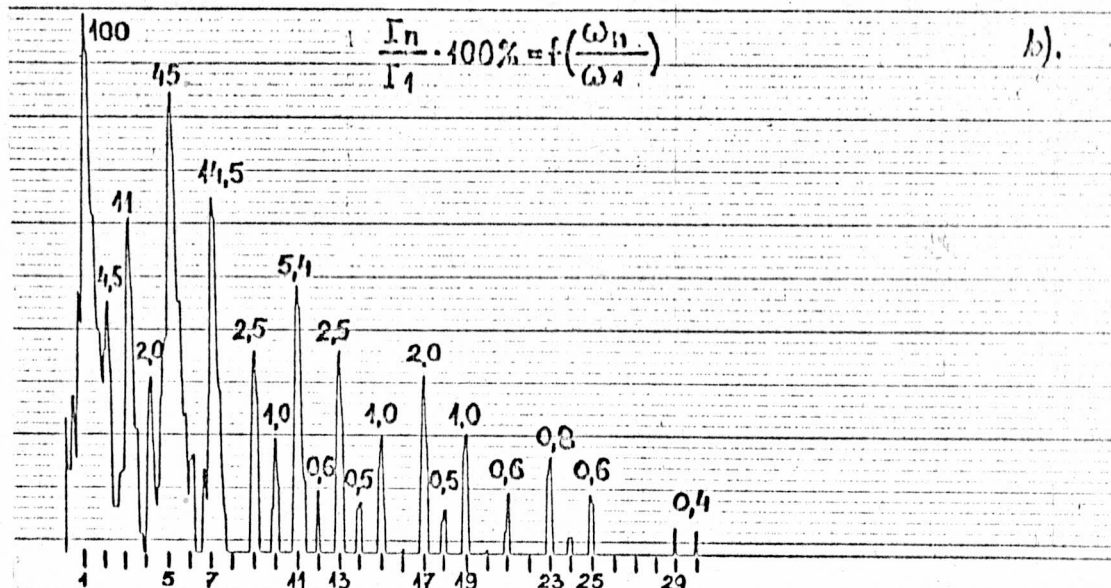
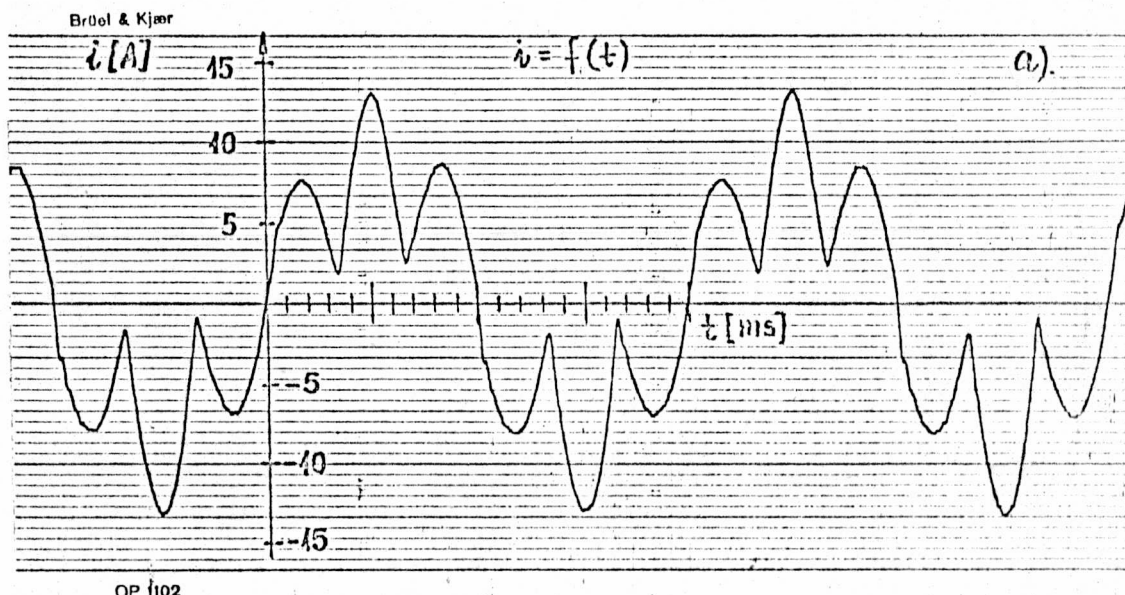
T.19. STR - 15/2 : rozdzielnia 6 kV. Transformator T-1 zasilający szafę I napędu MP-Prąd i_R transformatora T-1 po stronie 6 kV. Wartość skuteczna $I_R = 25$ A.
 a/. przebieg wartości chwilowych,
 b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:
 pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 183,6 s.



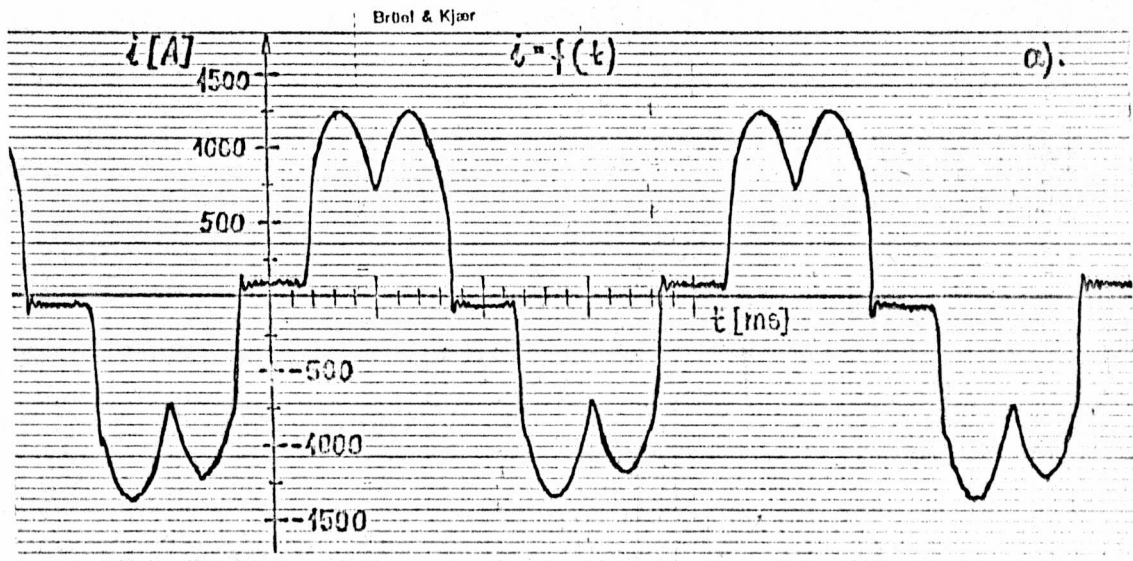
OP 1102



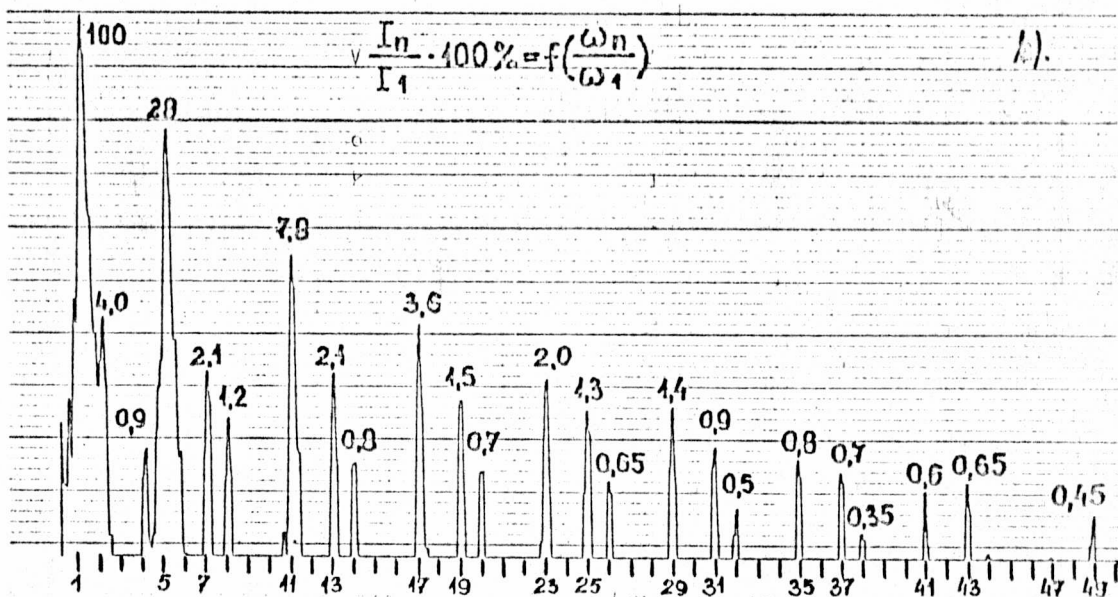
- T.20. STR - 15/2: rozdzielnia 6 kV. Transformator T-2 zasilający szafę II napędu MP-4.
 Napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach T-2 po stronie 6 kV.
 Wartość skuteczna $U_{RS} = 5,8$ kV.
 a/. przebieg wartości chwilowych,
 b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:
 pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 57,3 s.



- T.21. STR - 15/2: rozdzielnia 6 kV. Transformator T-2 zasilający szafę II napędu MP-4.
 Prąd i_R transformatora T-2 po stronie 6 kV. Wartość skuteczna $I_R = 9 A$.
 a/. przebieg wartości chwilowych;
 b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa;
 pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 183,6 s.



OP 1102



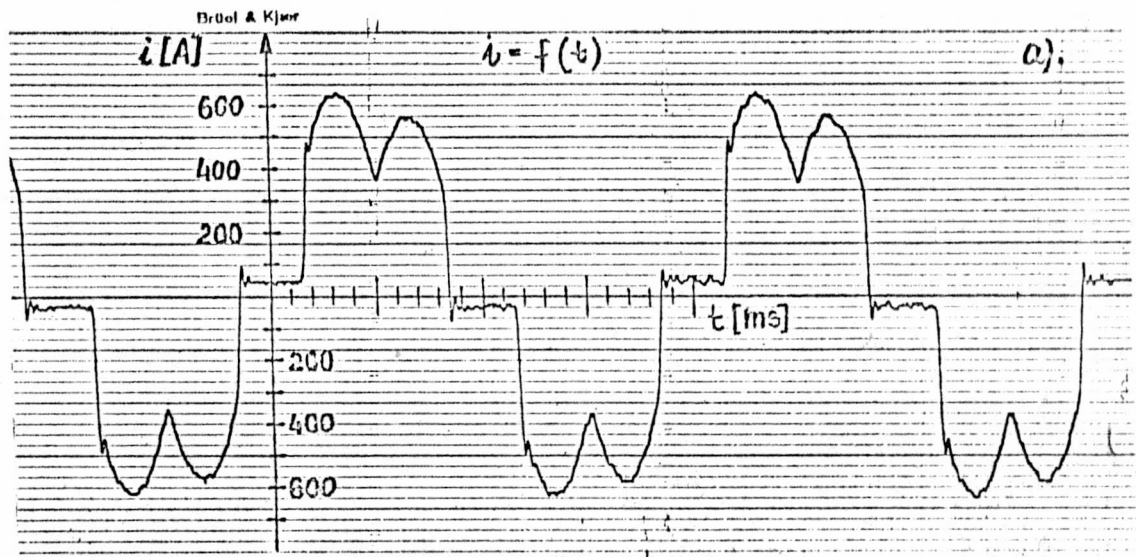
T.23. Rozdzielnia 0,4 kV napędu MP-5. Szafa ASEA.

Prąd I_T zasilania szafy ASEA. Wartość skuteczna $I_T = 980$ A.

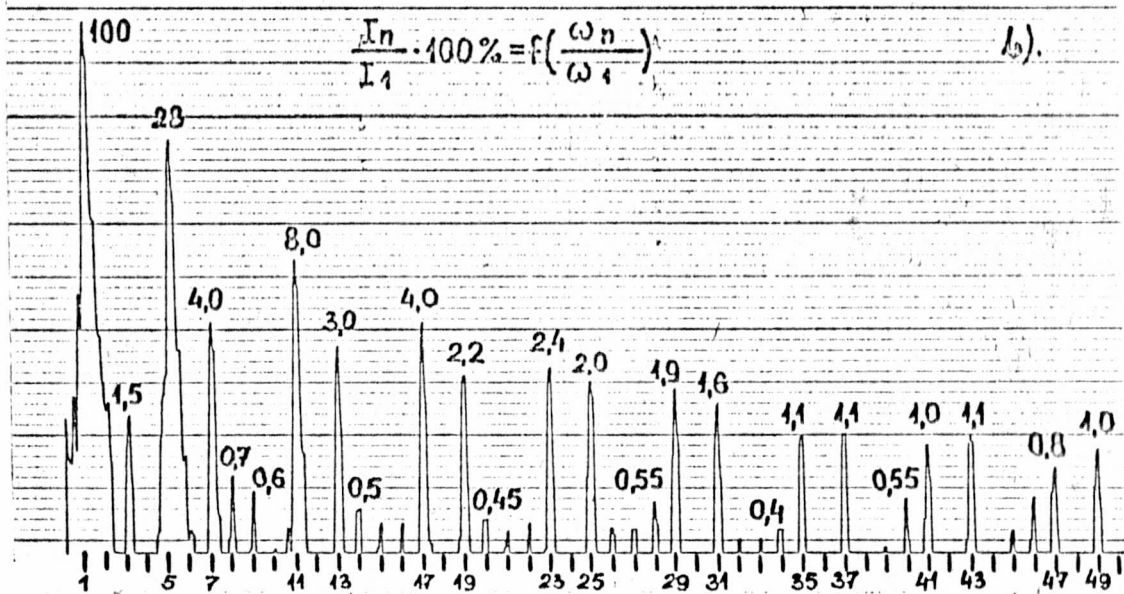
a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:

pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 183,6 s.



QP 1102



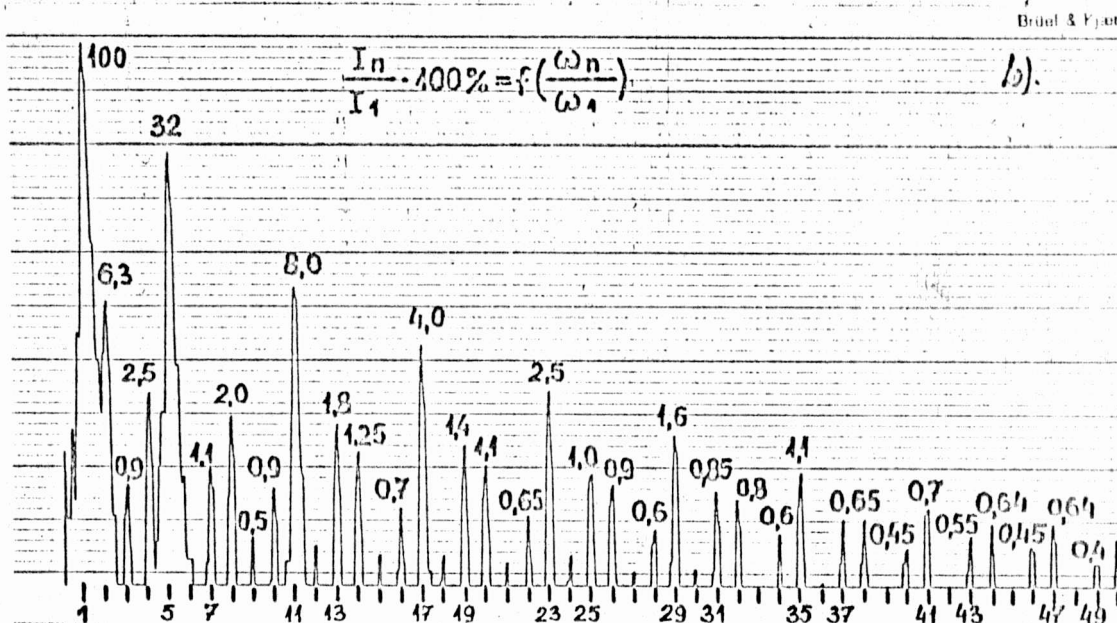
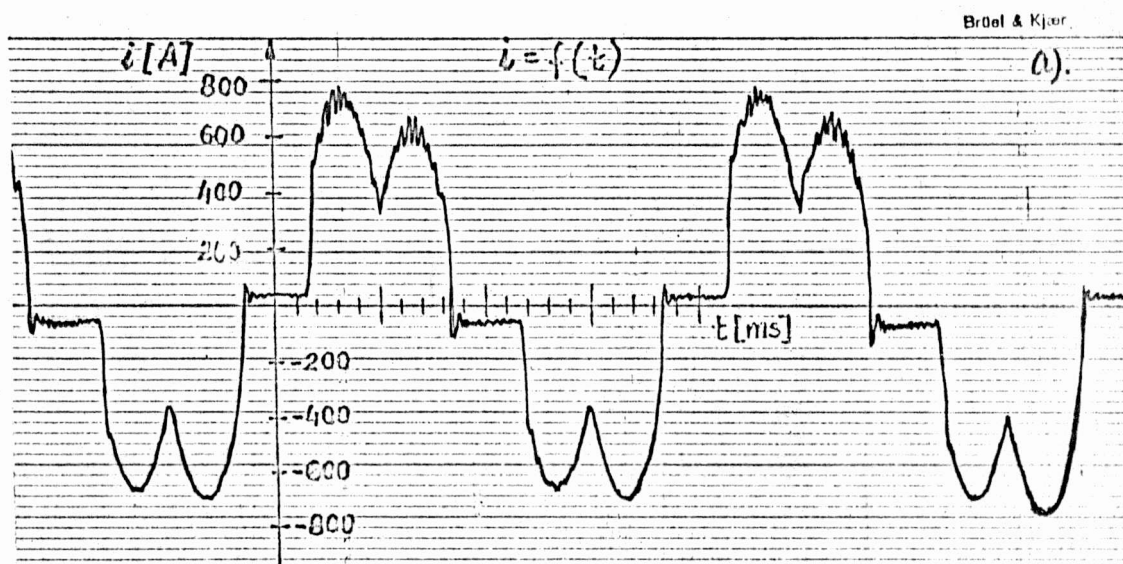
T.24. Rozdzielnia 0,4 kV. napędu MP-5. Szafa ASEA.

Prąd i_T napędu prasy ssącej. Wartość skuteczna $I_T = 470 A$.

a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:

pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 183,6 s.



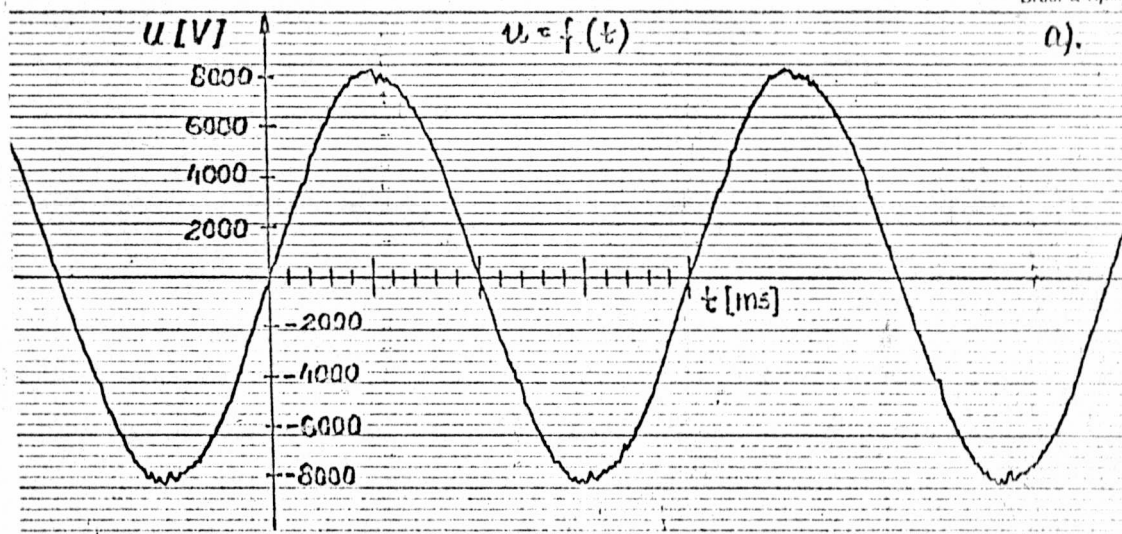
T.25. Rozdzielnia 0,4 kV napędu MP-5. Szafa ASE1.

Prąd i_T napędu walca napędowego sita. Wartość skuteczna $I_T = 530$ A.

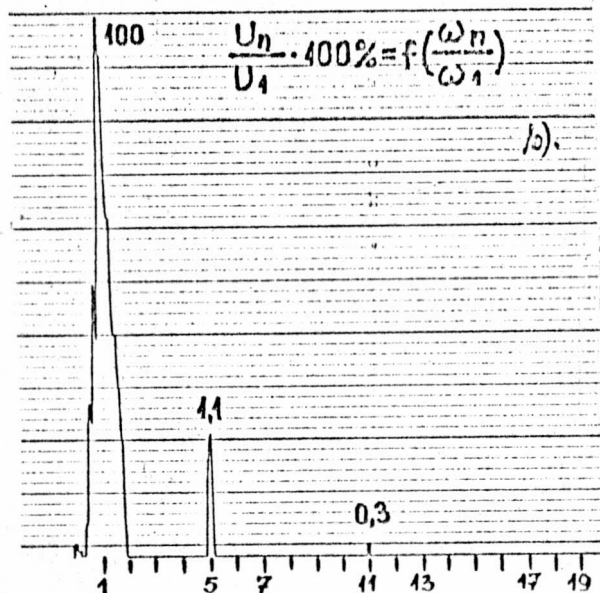
a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa;

pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 183,6 s.



OP 1102



T.26. STR -9/1 : rozdzielnia 6 kV. Transformator T-1 zasilający szafę ASEA napędu MP-5.

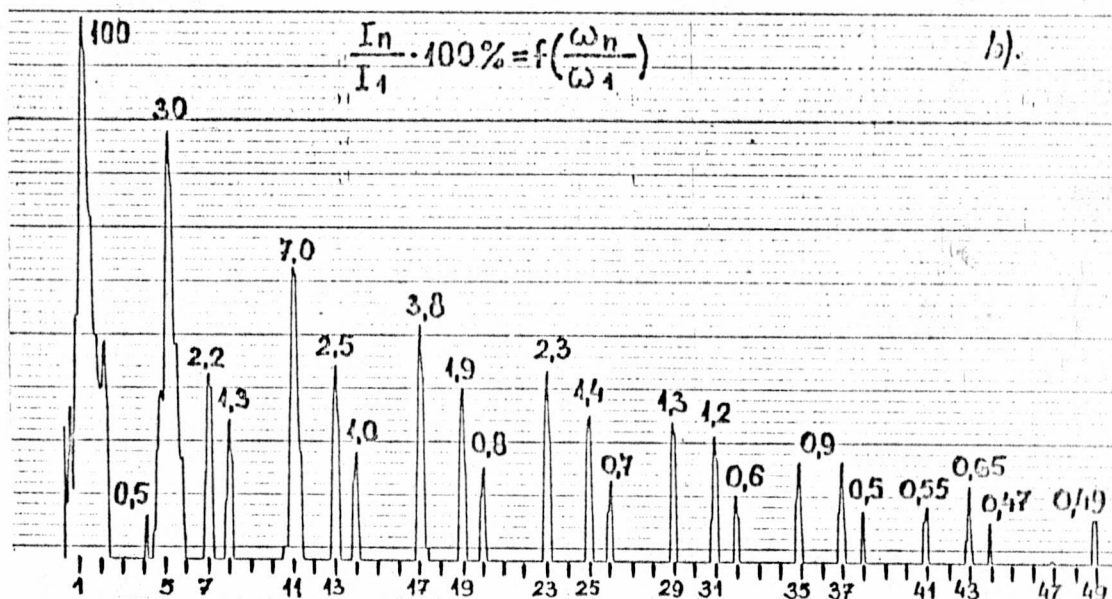
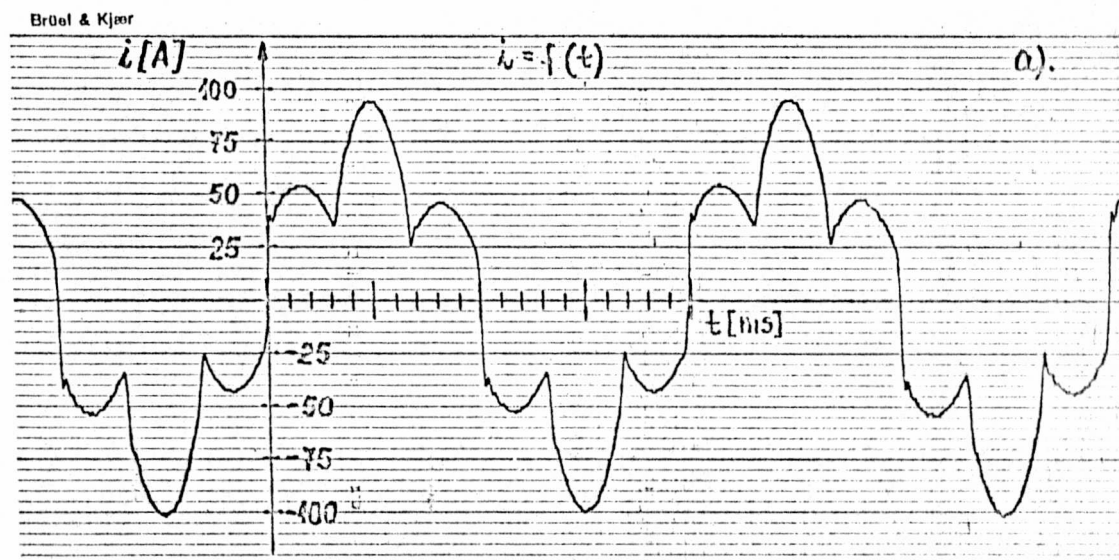
Napięcie skojarzone u_{RS} na zaciskach T-1 po stronie 6 kV.

Wartość skuteczna $U_{RS} = 5,9$ kV.

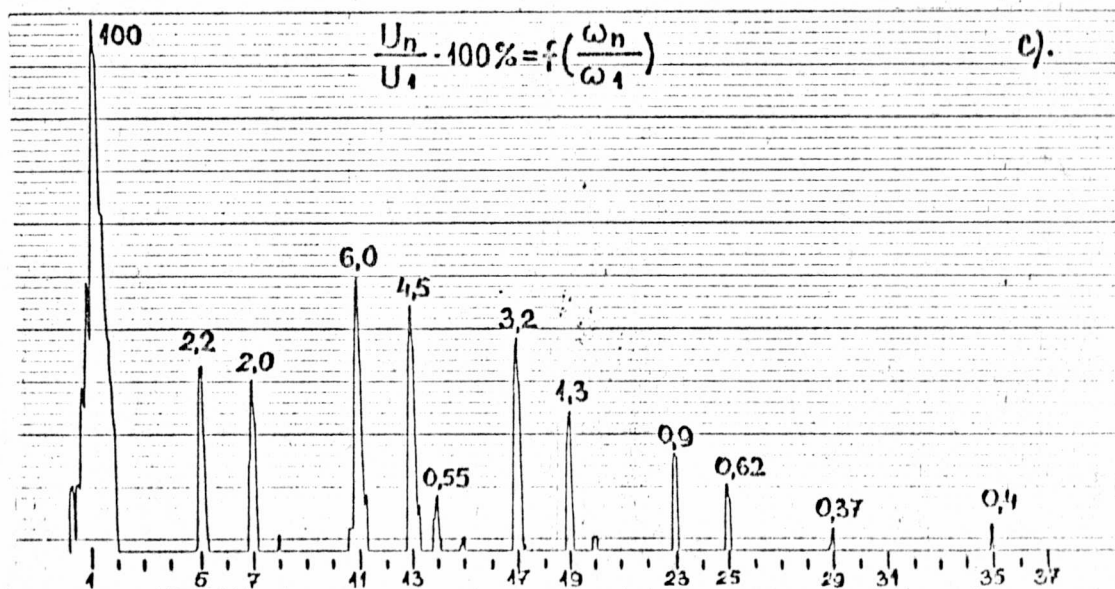
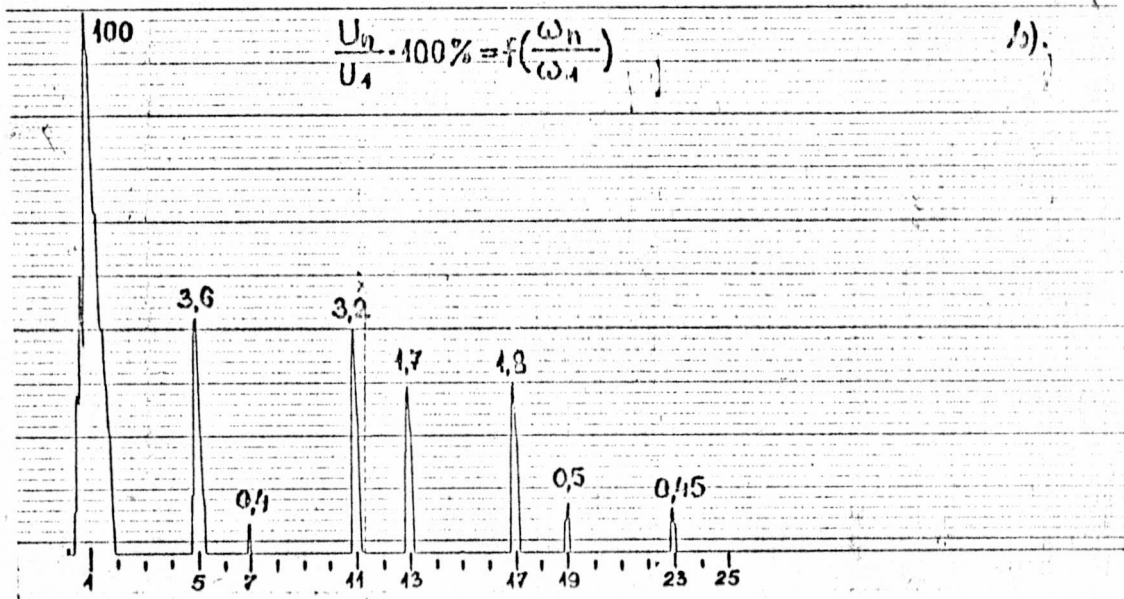
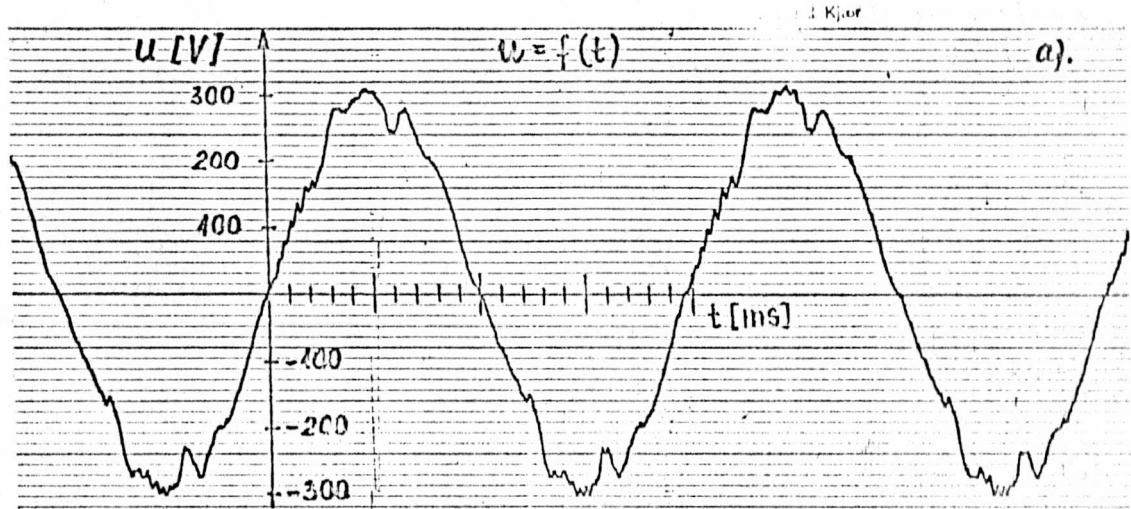
a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:

pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 57,3 s.



- T.27. STR - 9/1 : rozdzielnia 6 kV. Transformator T-1 zasilający szafę ASEA napędu MP-5. Prąd i_R transformatora T-1 po stronie 6 kV. Wartość skuteczna $I_R = 63$ A.
- a/. przebieg wartości chwilowych,
- b/. charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa:
- pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 183,6 s.



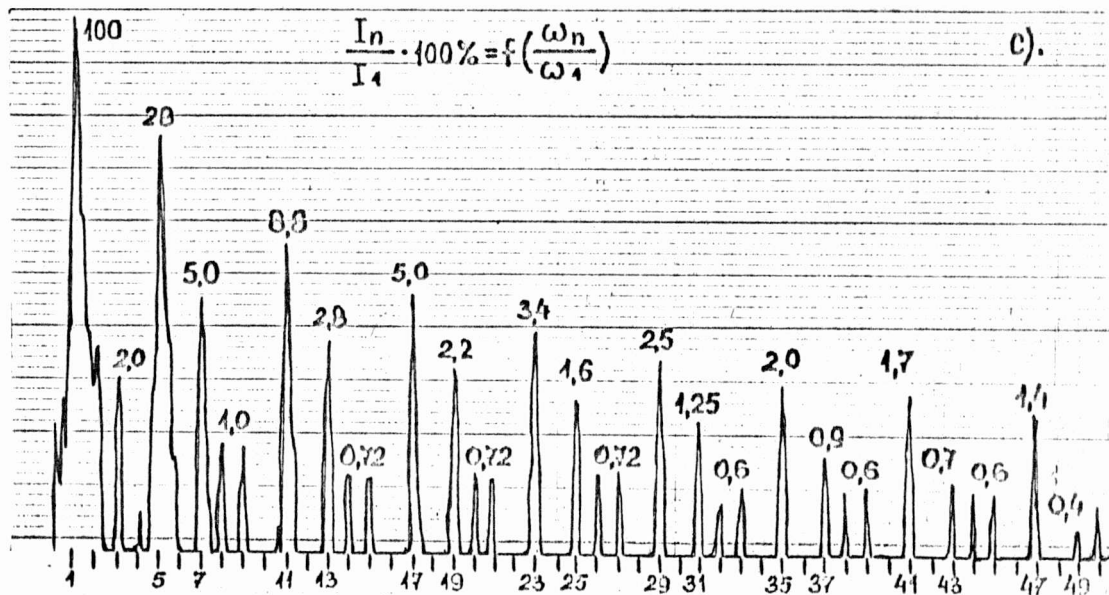
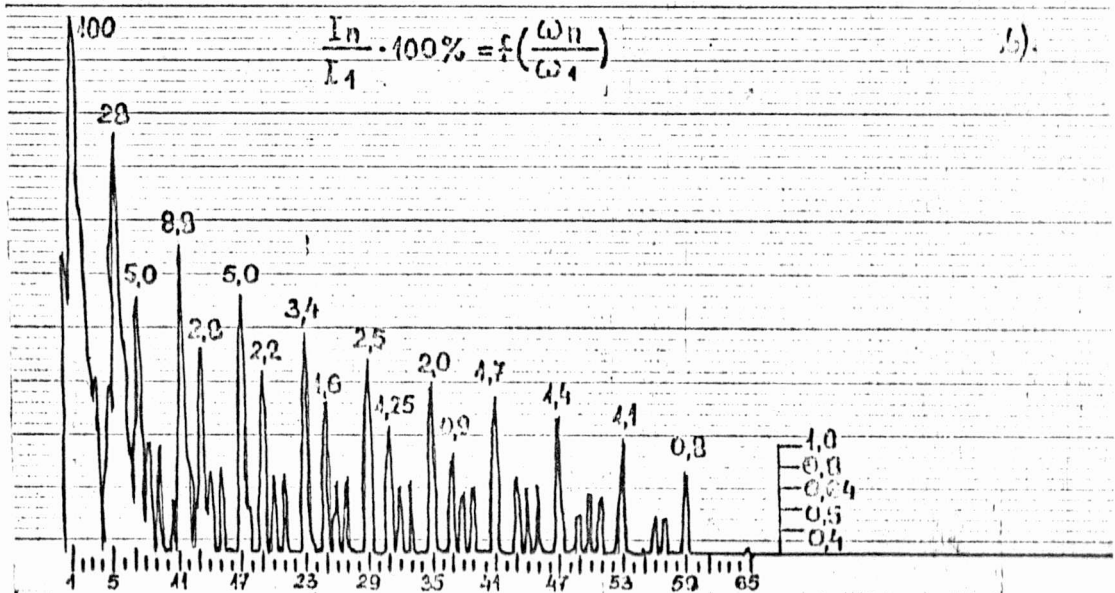
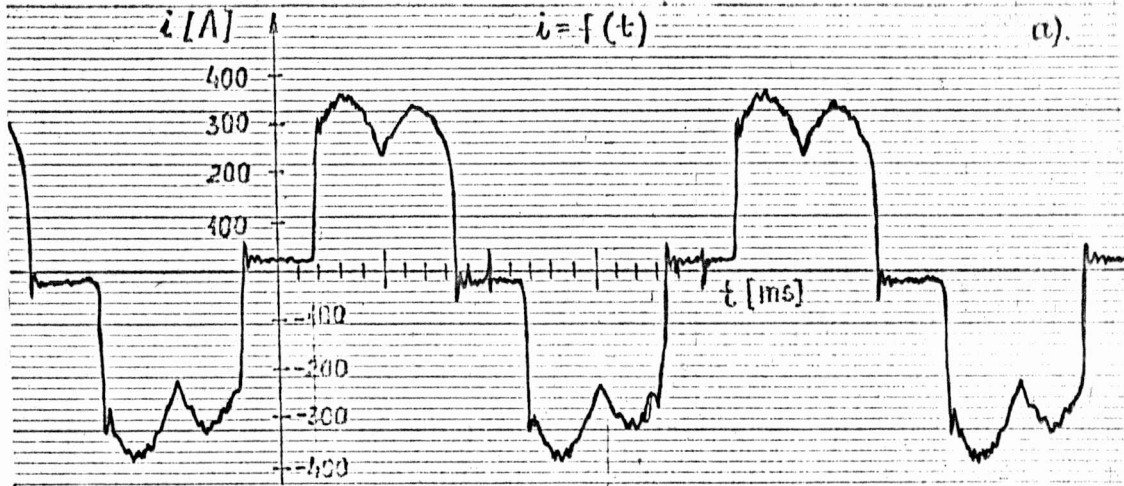
T.2B. Rozdzielnia 0,4 kV napędu głównego krajarki MP-4.

Napięcie fazowe u_{90} na szynach szafy zasilającej. Wartość skuteczna $U_{90} = 215$ V.

a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. ch-ka a-cz.: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 57,3 s,

c/. ch-ka a-cz.: pasmo - 2 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 40 ms.



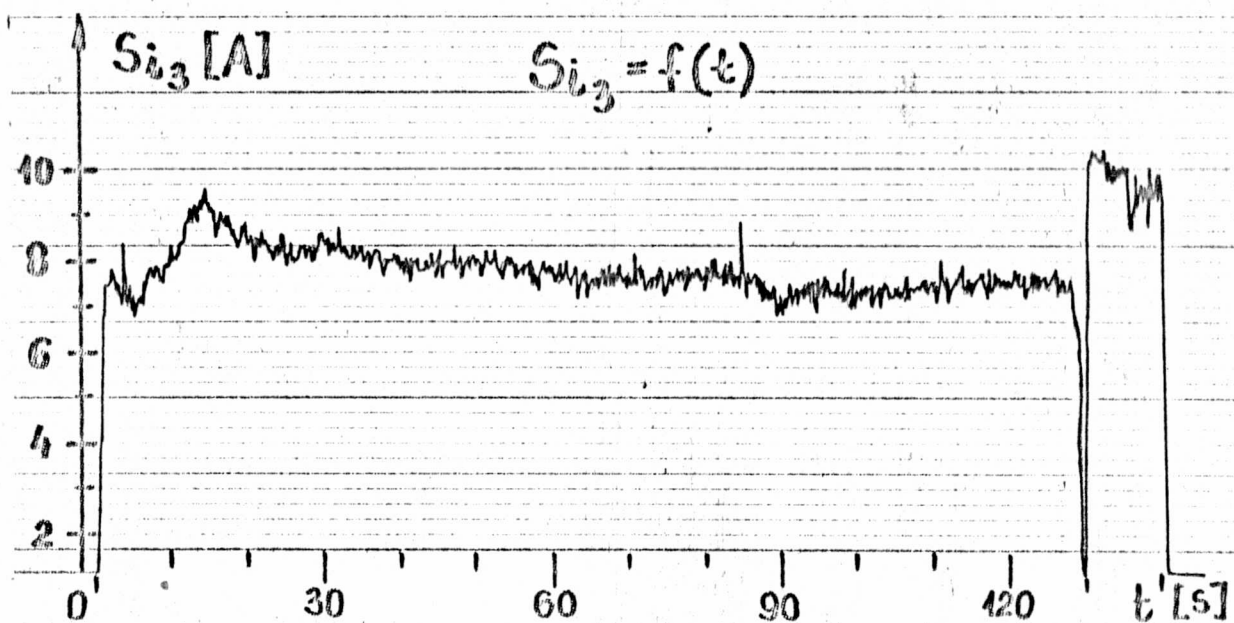
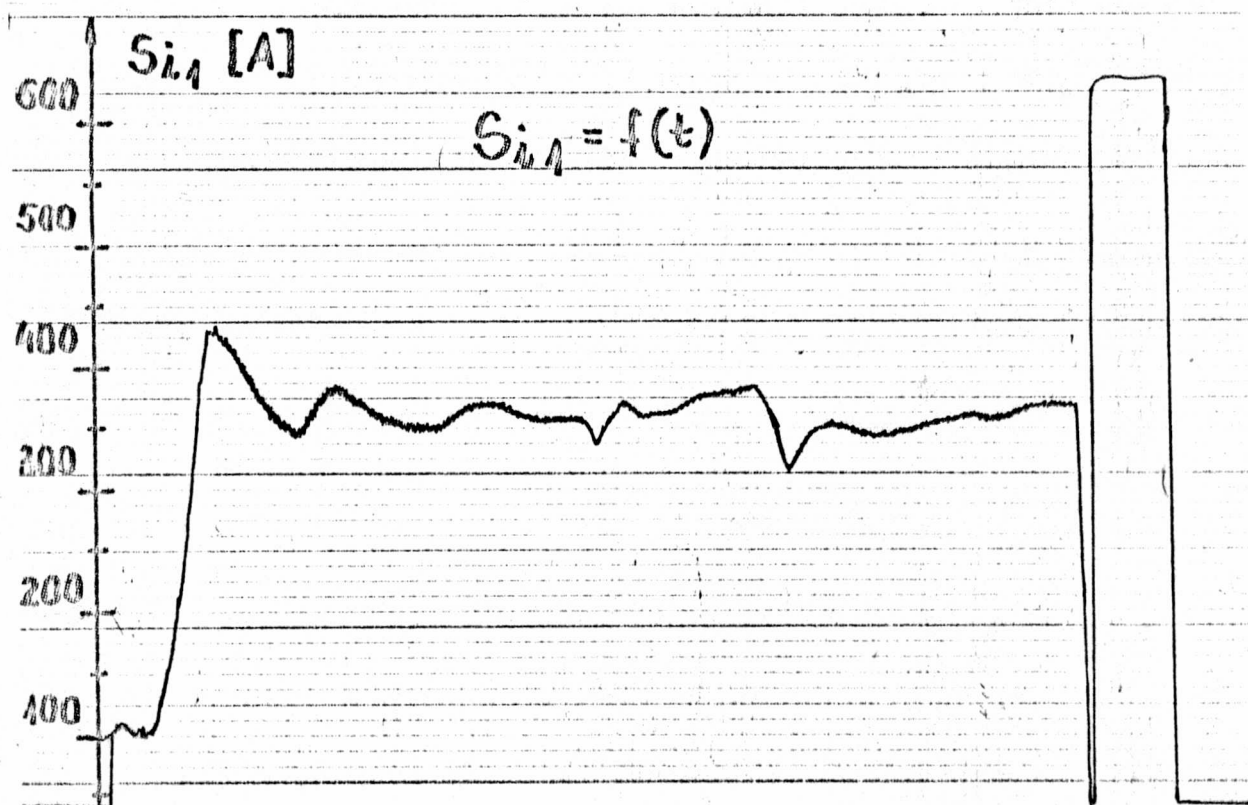
T.29. Rozdzielnia 0,4 kV napędu głównego krajarki MP-4.

Prąd I_n dopływa do szafy zasilającej. Wartość skuteczna $I_n = 270 A$.

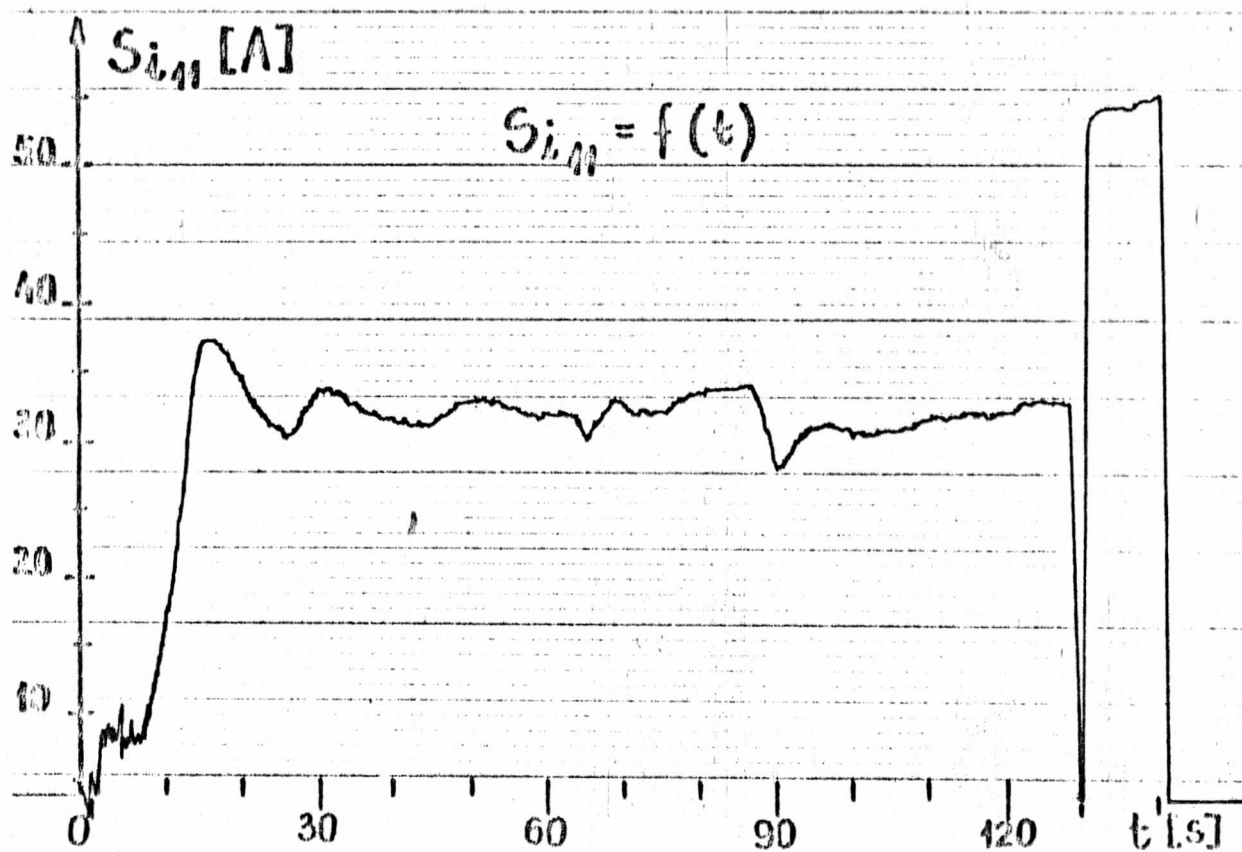
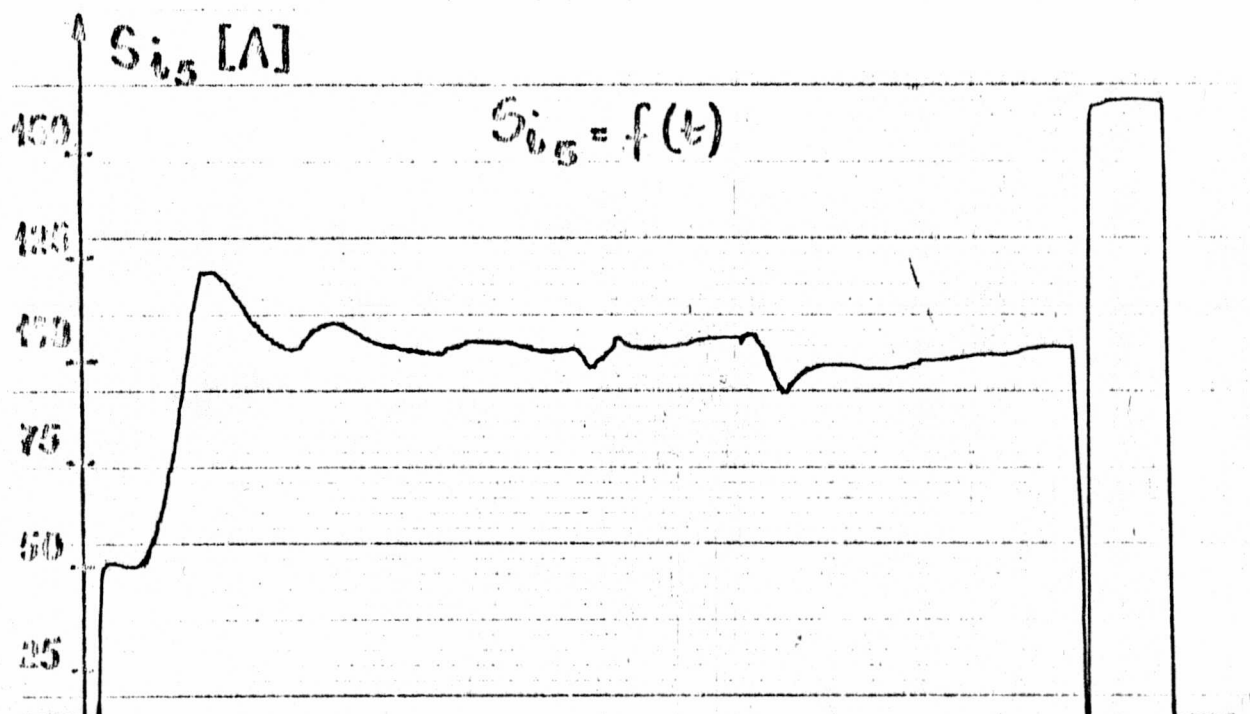
a/. przebieg wartości chwilowych,

b/. ch-ka a-cz.: pasmo - 5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 45,9 s,

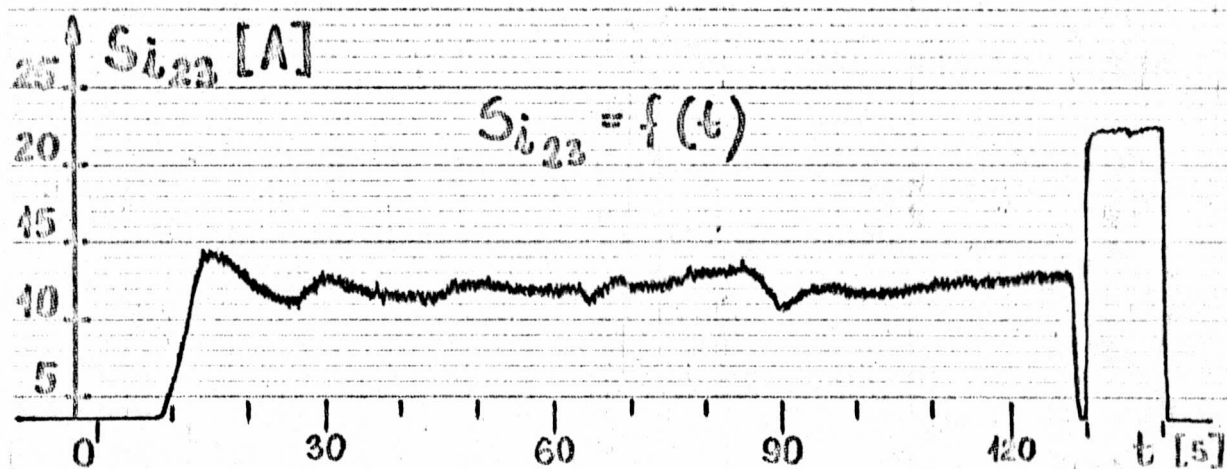
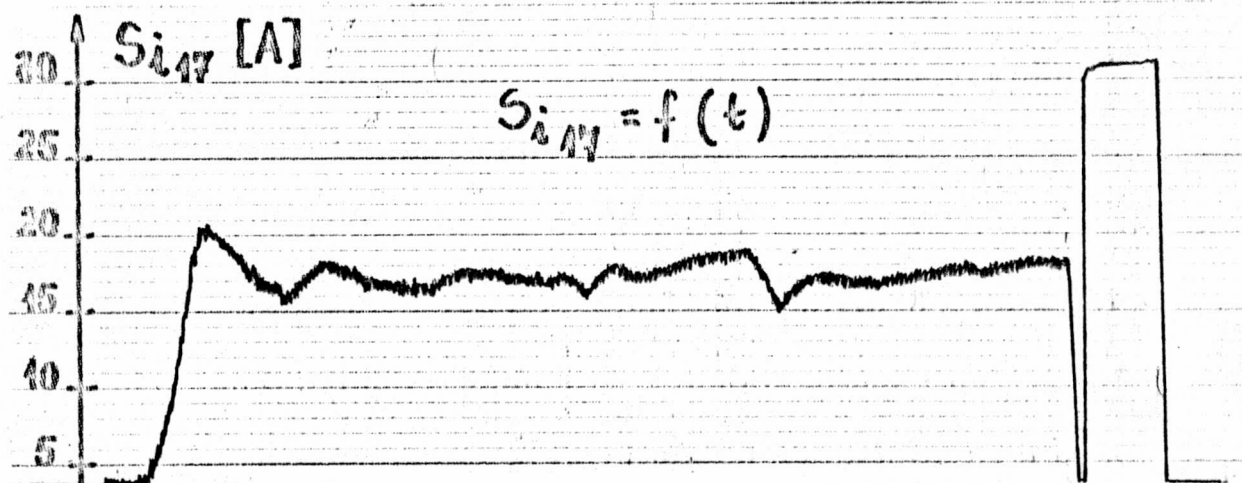
c/. ch-ka a-cz.: pasmo - 2,5 kHz, dynamika - 50 dB, czas uśredniania - 45-9 s.



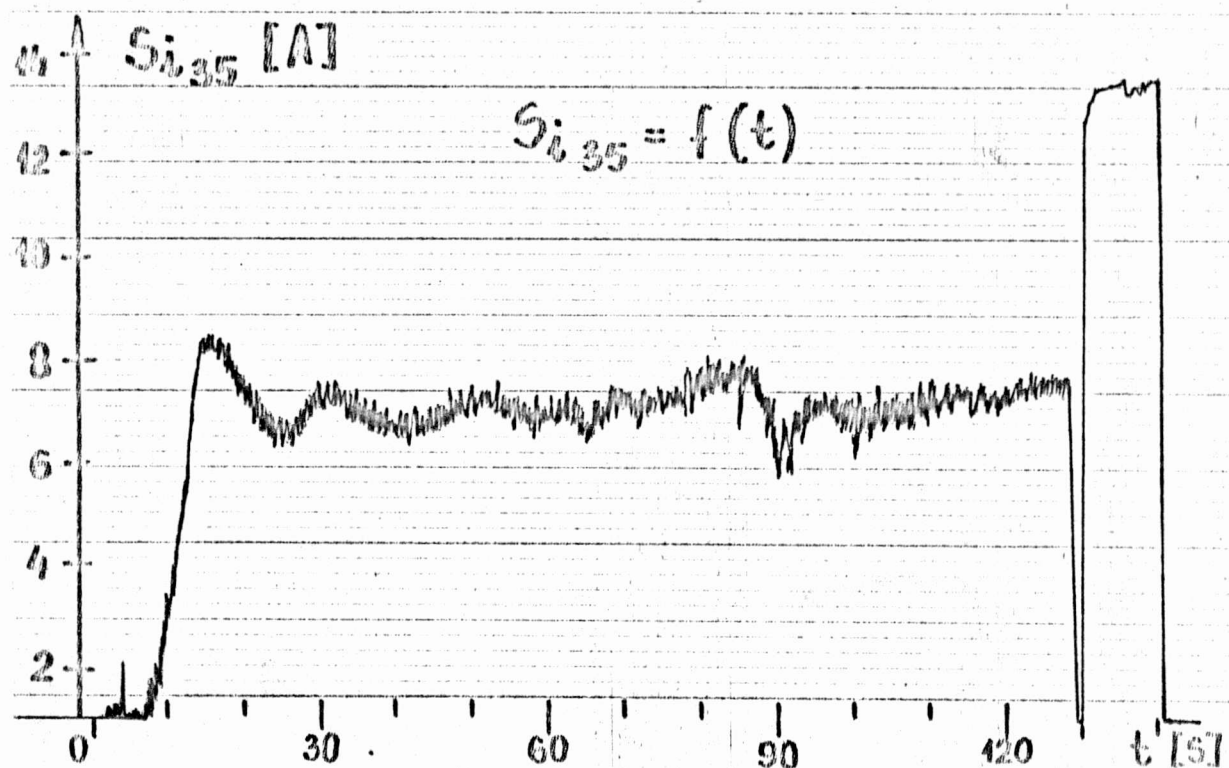
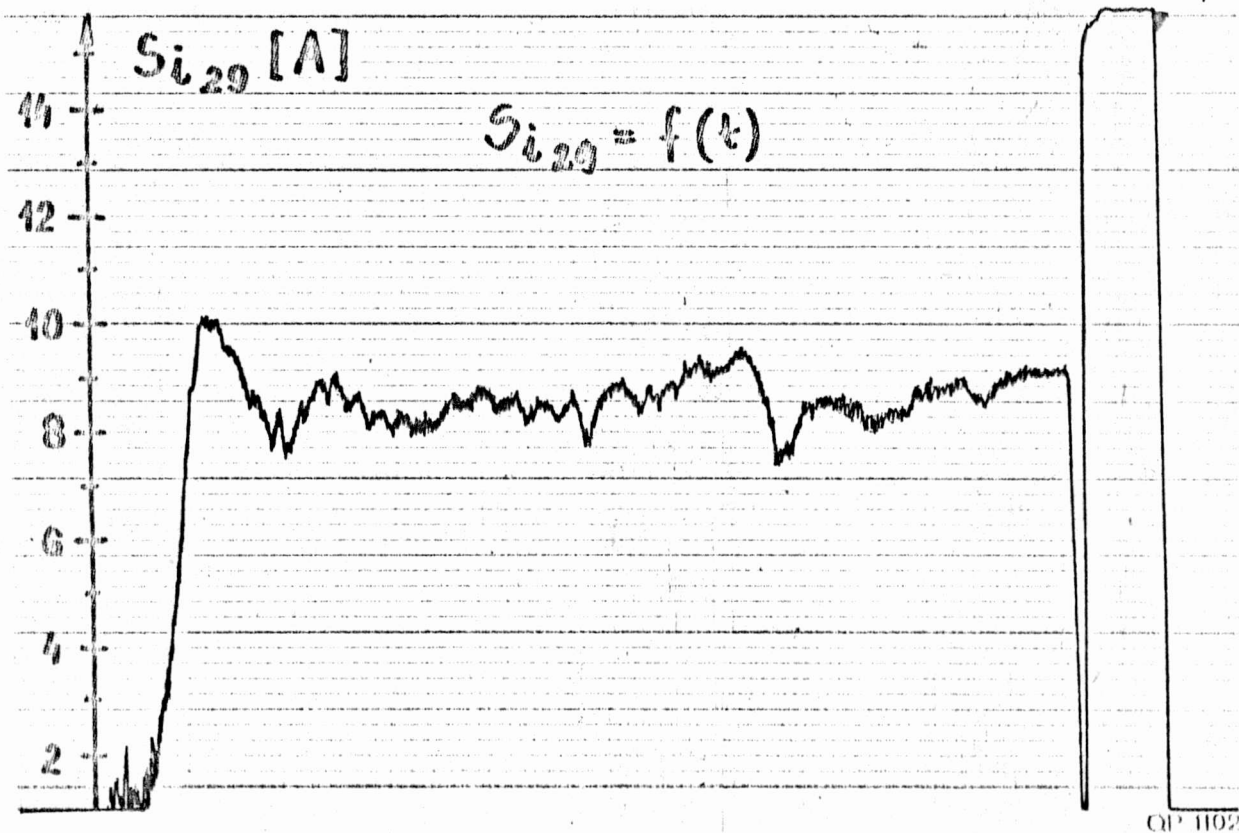
T.30. Rozdzielnia 0,4 kV napędu głównego krajarki MP-4.
Prąd i_g dopływu do szafy zasilającej.
Przebiegi obwiedni 1-szej i 3-ciej harmonicznej.



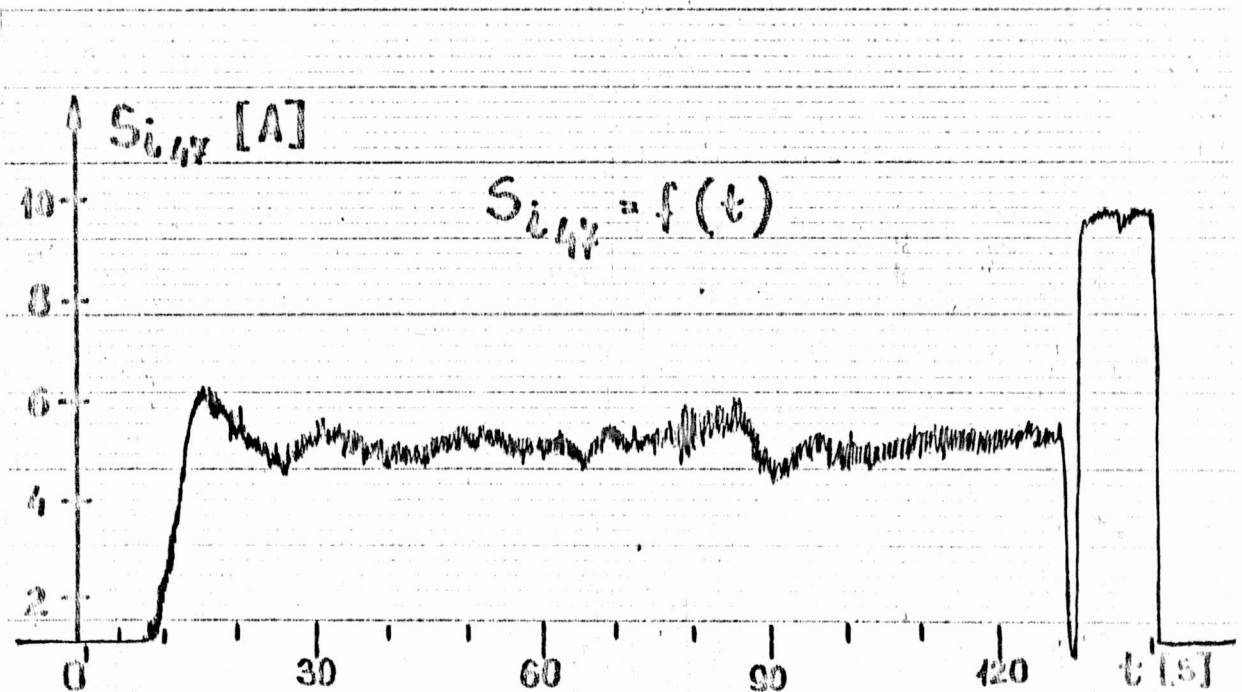
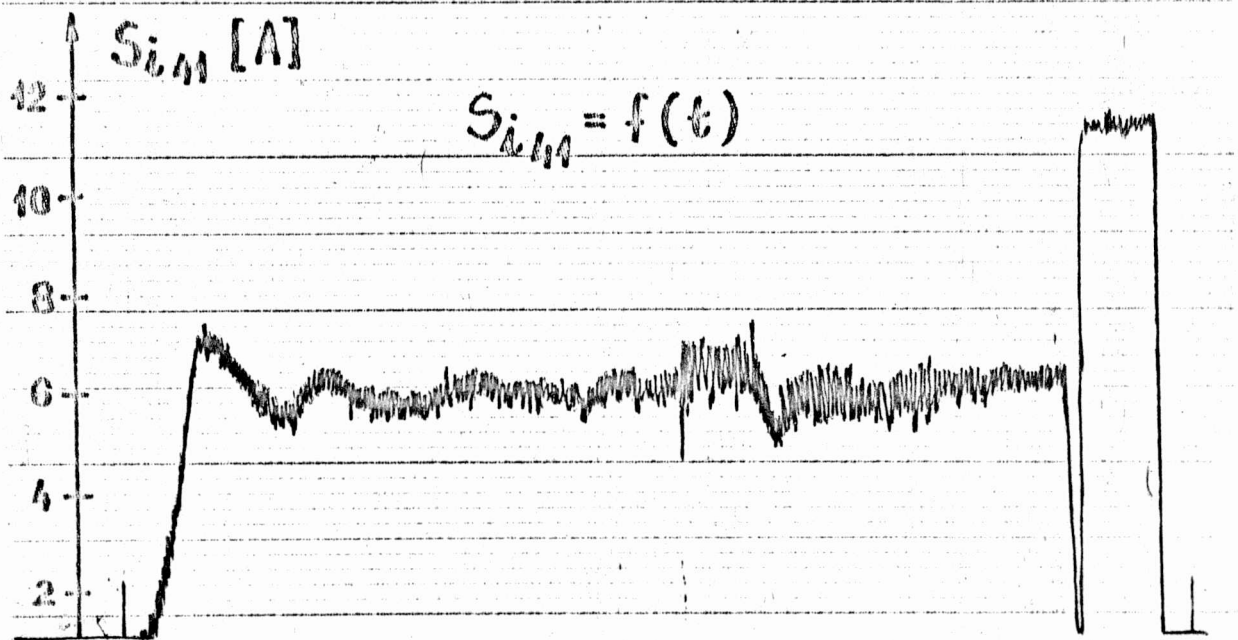
Т. 31. Rozdzielnia 0,4 kV napędu głównego krajarki MP-4.
Prąd I_n dopływu do szafy zasilającej.
Przebiegi obwiedni 5-tej i 11-tej harmonicznej.



- T. 32. Rozdzielnia 0,4 kV napędu głównego krajarki MP-4.
Prąd i_g dopływu do szafy zasilającej.
Obwiednie 17-tej i 23-ciej harmonicznej.



T.33. Rozdzielnia 0,4 kV napędu głównego krajarki MP-4.
Prąd i_g dopływu do szafy zasilającej.
Przebiegi obwiedni 29-tej i 35-tej harmonicznej.



П.34. Rozdzielnia 0,4 kV napędu głównego krajarki MP-4.
Prąd i_B dopływu do szafy zasilającej.
Przebiegi obwiedni 41-szej i 47-mej harmonicznej.

3. DOBÓR MOCY POSZCZEGÓLNYCH SEKCJI MASZyny PAPIERNICZEJ

Jak wiadomo poziom zawartości w_h w prądzie zasilającym przekształtnik tyrystorowy zależy w dużym stopniu od obciążenia tego napędu. Przyjmując za kryterium stopień odkształcenia prądu sieciowego, moc zainstalowana w napędach przekształtnikowych ma zbyt dużą wartość dla wszystkich sekcji maszyny papierniczej. W związku z tym w skrócie przedstawiono jedną z metod określania mocy zainstalowanej w przekształtnikach. Obecnie metoda ta jest dominującą w krajowym i zagranicznym przemyśle papierniczym.

Według tej metody mocy potrzebna do napędu maszyny papierniczej określona jest wzorem

$$P = k B v_r \quad [\text{kW}]$$

gdzie: B - szerokość maszyny [m],

v_r - prędkość robocza maszyny [m/min],

k - wskaźnik jednostkowego zapotrzebowania mocy [kW/(m²/min)].

Określenie wartości wskaźników jednostkowego zapotrzebowania mocy wymaga szerokich i kosztownych badań statystycznych wielu maszyn papierniczych. Na ogół przyjmuje się wartość współczynników podaną przez organizację TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). Szereg firm opracowało jednak zestawy wskaźników na swoje potrzeby niezależnie od TAPPI. Przykładowo jedyny krajowy producent maszyn papierniczych Fabryka Maszyn Papierniczych "Fampa" w Cieplicach korzysta ze wskaźników opracowanych przez amerykański koncern Beloit. Wartości współczynników podawane są w zależności od gatunku produkowanego papieru oraz prędkości i szerokości wstęgi w maszynie papierniczej głównej. Wyrażane są one w KM angielskich na 1 cal szerokości papiernicy i 100 stóp/min (f.p.m.) prędkości wstęgi. Rozróżnia się dwa rodzaje wskaźników jednostkowego zapotrzebowania mocy:

- a) k_{NRL} - do obliczania mocy przy normalnej pracy całej papiernicy lub jej sekcji (NRL - Normal Running Load),

b) k_{RDC} - do obliczania rzeczywistej mocy potrzebnej do napędu sekcji (RDC - Recommended Drive Capacity).

NRL inaczej normalne obciążenie ruchowe jest to moc wszystkich napędów mechanicznych w normalnym stanie pracy. Natomiast RDC inaczej zalecana moc napędu reprezentuje moc wszystkich napędów elektrycznych. Różnica między NRL i RDC stanowi margines bezpieczeństwa dla mocy liczonej wg NRL.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono przykładowo współczynniki jednostkowego zapotrzebowania mocy k_{NRL} i k_{RDC} oraz moce NRL i RDC dla sekcji maszyny papierniczej wg TAPPI.

Przy doborze przekształtników i silników do napędu maszyny papierniczej, obok zalecanej mocy napędu elektrycznego RDC, bierze się pod uwagę konieczność występowania małej liczby typów przekształtników i silników. Przeważnie ogranicza się liczbę typów przekształtników do 3-4, a silników do 2-5. Wiąże się to z dodatkowym przewymiarowaniem zalecanej mocy napędu. Fakt ten zwiększa trwałość silników, polepsza dynamikę napędu, ale w istotny sposób pogarsza stopień odkształcenia przebiegu prądu zasilającego oraz jakość energii elektrycznej. Wydaje się, że przy wzroście mocy zainstalowanej w przekształtnikach problem oddziaływania tyrystorowych napędów papierniczych na sieć zasilającą nabrał istotnego znaczenia.

T a b e l a 1

Współczynniki k_{NRL} i k_{RDC} oraz moce NRL i RDC dla sekcji do produkcji papierów drukowych, książkowych i kartonów o szerokości 6,35 m i zakresie prędkości 240...460 m/min przy gramaturze 200...65 g/m² (wg TAPPI)

Sekcja papiernicy	Wskaźnik k_{NRL} [$\frac{kW}{m \cdot 100 \text{ m/min}}$]	Moc NRL ¹⁾ przy 240 m/min [kW]	Wskaźnik k_{RDC} [$\frac{kW}{m \cdot 100 \text{ m/min}}$]	Moc RDC ²⁾ przy 460 m/min [kW]
Część sitowa	-	-	11,6	336
Sekcja pras	2,89	134,1	3,38	294
Sekcja susząca	1,16	53,7	2,6	228
Prasa gładząca	0,87	13,4	1,16	33,6
Pierwszy kalander	3,38	52,2	5,78	169
Drugi kalander	3,38	52,2	5,78	169
Nawijak Pope'go	0,77	11,9	1,93	56
1) $Moc \text{ NRL} = k_{NRL} \frac{6,35 \text{ m}}{1 \text{ m}} \cdot \frac{244 \text{ m/min}}{100 \text{ m/min}} = k_{NRL} \cdot 11,5$ 2) $Moc \text{ RDC} = k_{RDC} \frac{6,35 \text{ m}}{1 \text{ m}} \cdot \frac{458 \text{ m/min}}{100 \text{ m/min}} = k_{RDC} \cdot 29,1$				

T a b e l a 2

Współczynniki k_{NRL} i k_{RDC} oraz mocą NRL i RDC dla sekcji papiernicy do produkcji papierów gazetowych 50 g/m^2 o szerokości 6,35 m i maksymalnej prędkości 760 m/min (wg TAPPI)

Sekcja papiernicy	Wskaźnik k_{NRL} [$\frac{\text{kW}}{\text{m} \cdot 100 \text{ m/min}}$]	Moc NRL ¹⁾ przy 760 m/min [kW]	Wskaźnik k_{RDC} [$\frac{\text{kW}}{\text{m} \cdot 100 \text{ m/min}}$]	Moc RDC ²⁾ przy 760 m/min [kW]
Część sitowa	-	-	11,6	560
Walec "pick up"	4,82	23,2	0,965	46,6
Wyzymak	1,16	56	1,45	70,0
Sekcja pras	2,89	280	3,38	326
Sekcja susząca	2,1	306	4,72	684
Kalander	2,89	140	4,82	232
Nawijak Pope'go	0,77	37,3	1,16	56
1) $\text{Moc NRL} = k_{\text{NRL}} \frac{6,35 \text{ m}}{1 \text{ m}} \cdot \frac{760 \text{ m/min}}{100 \text{ m/min}} = 48,3 k_{\text{NRL}}$ 2) $\text{Moc RDC} = 48,3 k_{\text{RDC}}$				

ODBIORCY:

1. Promotor	1 egz
2. Recenzenci	3 egz
3. Fabryka Maszyn Papierniczych FAMPA	5 egz
4. Biblioteka Główna PWr	1 egz
5. OINT i BI-29	1 egz
6. Autor	2 egz
7. Redakcja I-29	1 egz

		1 2 3 4 5 6 7 8 9							
* N *		N N S V N V V N Ø 5 Ø 6							
Rozpocz. pr.		Zakończ. pr.		Upubl. pr.		Instytut		Nr tematu	
Ø 1 8 Ø						I 2 9			
Nr zlecenia		Nr archiwalny							
		I 2 9 / P - Ø 2 2 / 8 2 *							
Symbol UKD									
621.3		Elektrotechnika							
621.3-8		Napęd elektryczny							
621.314.63-52.00		Tyrystory-zastosowanie							
676.2.052		Maszyny papiernicze							
Opis bibliograficzny Pawłowski Maciej Analiza oddziaływania tyrystorowych napędów elektrycznych maszyn papierniczych na sieć wewnętrzną papierni. Raporty Inst.Ukł.Elektromasz. PWr 1982 ser. PRE nr 22/82 172 s., 43 rys., 16 tabl., bibliogr. 57 poz. (maszyn. powiel.) 172,9 Rozprawa doktorska Politechnika Wrocławska, Instytut Układów Elektromaszynowych, Wrocław Promotor: doc. dr hab. inż. Andrzej Horodecki									
Charakter pracy: stosowana					Rozpowszechnienie				
Materiały odpłatne					V				