

## UKŁAD POMIARU SYMETRYCZNYCH I ASYMETRYCZNYCH PRĄDÓW ZWARCIOWYCH Z ZASTOSOWANIEM WIELOZAKRESOWYCH PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH W WARUNKACH LABORATORIUM ZWARCIOWEGO

Michał BABIUCH<sup>1</sup>, Jan OLAK<sup>2</sup>

1. Instytut Elektrotechniki w Warszawie  
tel.: 604 579 722 e-mail: m.babiuch@iel.waw.pl
2. Transformex sp. z o.o. w Warszawie  
tel.: 502 360 346 e-mail: janolak@transformex.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono różne wymagania zawarte w normach przedmiotowych, dotyczące parametrów probierczych dla aparatury elektroenergetycznej i różnych rodzajów badań wykonywanych w laboratorium zwarciovym. Opisano wyposażenie badawczo pomiarowe Zwarciovni Instytutu Elektrotechniki w Warszawie (IEL). Przedstawiono układ pomiaru prądów zwarciovych przy użyciu nowo opracowanych przekładników. Opisano metodę sprawdzenia dokładności przekładników prądowych do pomiaru prądów zwarciovych i zamieszczono przykładowe wyniki i oscylogramy z badań. Układ został wdrożony i jest eksploatowany w Zwarciovni IEL.

**Słowa kluczowe:** badania zwarciovie, pomiary prądów zwarciovych, przekładnik prądowy.

### 1. WSTĘP

Instalowana w systemie elektroenergetycznym aparatura, w tym szczególnie aparatura rozdzielcza, musi być przystosowana do pracy w sytuacjach awaryjnych. Symulowanie stanów awaryjnych i badanie odporności urządzeń na sytuacje awaryjne przeprowadza się w specjalistycznych laboratoriach wielkich mocy tzw. zwarciovniach. Podstawowe badania jakie przeprowadza się w zwarciovni, to: a) badanie zdolności łączeniowej (np. łączenie w szeregu SPZ, przy opozycji faz, zwarć pobliskich, baterii kondensatorów, linii długich itp.) b) badania wytrzymałości zwarcioviej cieplnej tzw. obciążalności zwarcioviej prądem krótkotrwałym wytrzymywanym i szczytowym wytrzymywanym, c) próby łukowe – badanie odporności urządzeń na wystąpienie wewnętrznego zwarcia łukowego. Badania te dotyczą między innymi rozdzielnic, stacji prefabrykowanych, przekładników, transformatorów, kabli, skrzynek przyłączowych, silników. Jednym z podstawowych parametrów, który podczas tych badań, musi być uwzględniony i wiarygodnie pomierzony, jest prąd zwarciovoy. Prąd zwarciovoy składa się ze składowej symetrycznej (sinusoidalnej) oraz składowej asymetrycznej (nieokresowej), której zanikanie charakteryzuje tzw. „stała czasowa tłumienia składowej nieokresowej prądu zwarciovego -  $\tau$ ”. W praktyce „stała czasowa” to wartość czasu, w którym chwilowa wartość składowej nieokresowej wynosi  $e^{-1} = 0,3678$  początkowej wartości tej składowej. Podstawowy wzór określający składową nieokresową

$$i_d = I_{d0} e^{-\frac{R}{L}t} = I_{d0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

gdzie:  $i_d$  – wartość chwilowa składowej nieokresowej,  
 $I_{d0}$  – wartość początkowa składowej nieokresowej,  
 $\tau = L/R$  – stała czasowa obwodu,  $e$  – podstawa logarytmu naturalnego.

O ile pomiar prądu symetrycznego nie sprawia trudności, to wiarygodny pomiar prądu asymetrycznego wymaga szczególnej uwagi, zwłaszcza przy pomiarze prądu zwarciovego przekładnikami. Składowa stała obwodu może powodować nasycenie się rdzenia przekładnika co prowadzi do powstawiania błędów transformacji. Aby ograniczyć te błędy należy dążyć do tego aby przekładnik się nie nasycił.

### 2. WYMAGANIA DOTYCZĄCE STAŁEJ CZASOWEJ PRĄDÓW NIESYMETRYCZNYCH DLA RÓŻNYCH BADAŃ

Staća czasowa jest jednym z parametrów charakteryzujących przebieg składowej nieokresowej prądu zwarciovego. Znajomość stałej czasowej ma istotne znaczenie na etapie przygotowywania układu probierczego do badań.

Normy przedmiotowe charakteryzują obwód zwarciovoy między innymi poprzez wymaganie ustawienia konkretnego  $\cos(\varphi)$  obwodu, współczynnika udaru prądu zwarciovego  $k$  (stosunek wartości pierwszego szczytu prądu zwarciovego do wartości skutecznej składowej okresowej) lub czasami stosunku wielkości  $X/R$  w obwodzie. Wielkości te są ściśle powiązane ze stałą czasową. Dla 50 Hz ilościowe zależności przedstawiono w tab. 1.

W przeważającej części badań, szczególnie aparatury rozdzielczej średniego napięcia wymagany współczynnik udaru wynosi  $k = 2,5$ . Jednocześnie dla wielu prób wymagany współczynnik  $k$  jest różny. Dla transformatorów kategorii I (25 kVA do 2,5 MVA) współczynnik udaru zmienia się w zakresie 1,51 do 2,51, dla transformatorów kategorii II (2,5 MVA do 100 MVA) wynosi 2,55, natomiast dla kategorii III (powyżej 100 MVA)  $k=2,69$ . Dla aparatury niskiego napięcia wymagany współczynnik udaru zmienia się w przedziale  $k=1,5 \div 2,2$ . Również w próbach

łukoodporności współczynnik może być różny np. w badaniu rozdzielnic czy stacji spodziewany współczynnik wymagany wynosi  $k=2,5$  (w czasie próby dopuszcza się jego zmniejszenie o 10 %) ale w badaniu odporności na zwarcie wewnętrzne przekładnika wysokonapięciowego współczynnik jest stosunkowo niski i wynosi  $k=1,7$ .

Tab. 1. Podstawowe zależności parametrów obwodu i prądu zwarciovego dla 50 Hz

X/R	1	2	3	4	5	6
$\cos(\varphi)$	0,707	0,447	0,316	0,243	0,196	0,164
$\tau$ [ ms ]	3,2	6,4	9,6	12,7	15,9	19,1
<b>k</b>	1,510	1,760	1,950	2,090	2,190	2,270

	8	10	12	14	20	25
	0,124	0,100	0,083	0,071	0,050	0,040
	25,5	31,8	38,2	44,6	63,7	79,6
	2,380	2,460	2,529	2,550	2,739	2,831

Stałą czasowej najczęściej uwagi poświęca się w normie dot. badania wyłączników (wyd. 2001r.). W normie zacytowana jest też obszerna dyskusja przeprowadzona przez Grupę Roboczą CIGRE WG13-04. Przyjmuje się standardową „znamionową stałą czasową”, która wynosi  $\tau = 45$  ms i nazywa się ją „wartością znormalizowaną”. Ta wartość stałej czasowej jest właściwa dla większości realnych przypadków. Rozważa się również inne wartości stałej czasowej  $\tau = 60$  ms, 75 ms, 120 ms ale traktowane są one jako „szczególny przypadek stałych czasowych”. Ponieważ stałe czasowe uzyskiwane w laboratoriach zwarciowych różnią się między sobą to norma precyzuje i podaje procedury postępowania w sytuacji kiedy stała czasowa obwodu probierczego jest większa lub mniejsza od wartości przypisanej. Badania wykonane przy większej wartości dla przypisanych wartości mniejszych uznaje się pod warunkiem, że składowa okresowa ma tą samą wartość lub większą i zachowane są wymagane parametry napięcia powrotnego. W laboratorium zwarciowym IEL naturalna stała czasowa, związana z maksymalnym prądem zwarciowym przy napięciu generatorowym, wynosi ok. 50ms.

### 3. ZAŁOŻENIA I WYBÓR KONSTRUKCJI PRZEKŁADNIKÓW

W laboratorium zwarciowym Instytutu Elektrotechniki gdy jest to tylko możliwe wykonuje się pomiary prądu zwarciowego za pomocą boczników. Uzasadnione to jest wysokimi walorami pomiarowymi boczników - bezproblemowy pomiar prądów probierczych stałych, w tym składowej stałej prądu zwarciowego, oraz przemiennych. Kiedy w układzie nie można zamontować i bezpośrednio uzmiąć boczników konieczny jest pomiar prądu pod wysokim potencjałem a więc np. za pomocą przekładników.

W zwarciowni IEL założono, że przekładniki prądowe zaprojektowane do modernizowanego układu probierczego, nie będą się nasycaly przy przepływie prądu probierczego w pełnym zakresie pomiarowym (tab. 2), dla maksymalnej wartości stałej czasowej  $\tau = 60$  ms.

Opracowane i wykonane przekładniki, po 2 szt. na każdą fazę, o tak dobranych parametrach znamionowych,

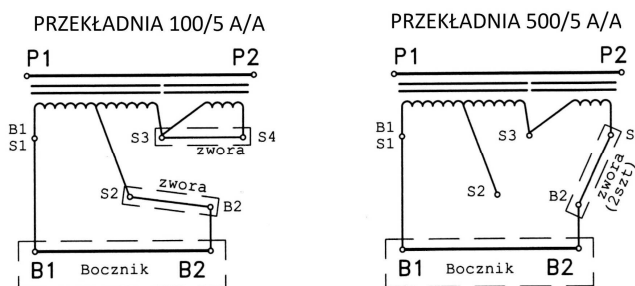
aby obejmowały pełen zakres prądów probierczych, bez potrzeby rozmontowywania toru prądowego. Tor probierczy ma dwie gałęzie równoległe, z zaciskami do przyłączenia obiektu badanego (fot. 1). Jedna gałąź służy do badań prądem symetrycznym o wartości od 50 A do 2500 A, a druga od 1 kA do 65 kA. Obciążenie przekładników stanowią bezindukcyjne boczniki o rezystancji 50 mΩ.

### 4. OPIS KONSTRUKCJI PRZEKŁADNIKA

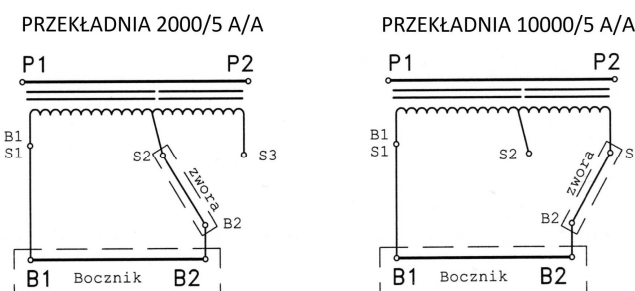
Przekładniki zaprojektowane i wykonane w firmie Transformex mają konstrukcję przepustową, rdzenie pierścieniowe bezszczelinowe. Uzwojenia pierwotne stanowią przepusty na napięcie znamionowe 30 kV i prąd zwarciowy 1 sek. 65 kA. Przełączanie zakresów znamionowego prądu pierwotnego każdego przekładnika odbywa się po stronie wtórnej, w skrzynce przełączeniowej zainstalowanej w korytarzu szynowym zwarciowni. Przyjęte wartości znamionowych prądów pierwotnych  $I_{1n}$  oraz zakresy pomiarowe przekładników (tab. 2) umożliwiają, w zależności od rodzaju próby, właściwy dobór przekładni przekładników i dokładny pomiar prądu zwarciowego w bardzo szerokim zakresie prądów probierczych zwarciowych, t.j. od 50 A do 65 kA.

Tab. 2. Parametry znamionowe przekładników

	Typ PL-30/E2		Typ PL-30/E1	
$I_{1n}$	2000 A	10 000 A	100 A	500 A
Zakres pomiarowy	1 kA–10 kA	5 kA–65 kA	50A - 500A	250 A - 2500A
$I_{2n}$	5 A	5 A	5 A	5 A
$S_{2max}$	2,5 VA	2,5 VA	2,5VA	2,5VA
klasa	0,1	0,1	0,1	0,1
zaciski	S1-S2	S1-S3	S1-S2	S1-S3
Napięcie na boczniku 50 mΩ	0,125 V-1,25 V	0,125 V-1,625 V	0,125 V-1,25 V	0,125 V-1,25 V



Rys. 1. Schemat uzwojeń przekładnika typu PL – 30/E-1



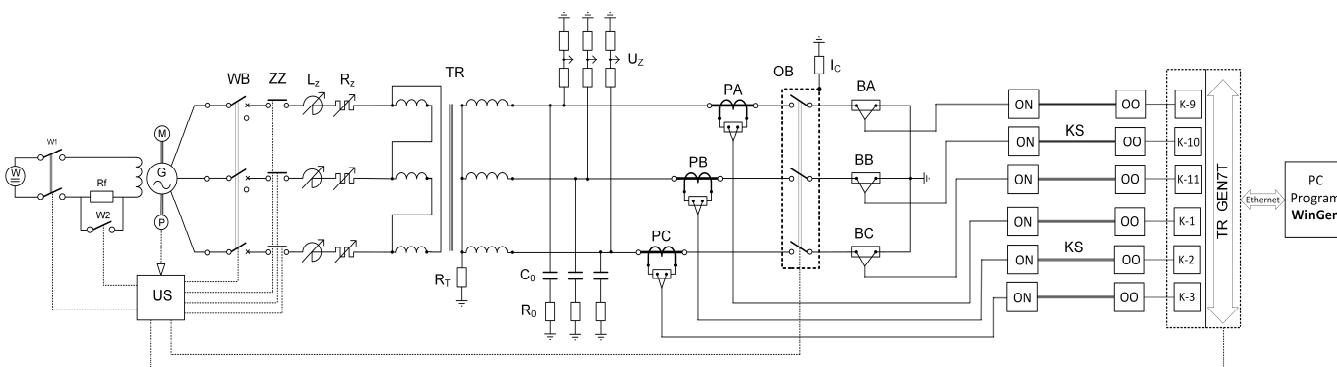
Rys. 2. Schemat uzwojeń przekładnika typu PL – 30/E-1



Fot. 1. Układ przekładników zamontowanych w obwodzie zwiarciovym IEL ( komora VI )

## 5. UKŁAD BADAWCZY I POMIAROWO REJESTRUJĄCY

W celu sprawdzenia dokładności przetwarzania prądów zwarciovych przez przekładniki zastosowano typowy układ probierczy i pomiarowy eksploatowany w zwiarciovni IEL podczas badań zdolności łączeniowej aparatury rozdzielczej - w tym konkretnym przypadku wyłączników. Układ przedstawiono schematycznie na rysunku 3. Laboratorium zwiarciovie IEL dysponuje dwoma generatorami zwiarciovymi G o mocy typowej 31,5 MVA oraz 100 MVA i odpowiednio o mocy zwiarciovej 500 MVA oraz 2500 MVA. Generatory napędzane są silnikiem M (pierścieniowy indukcyjny z wielostopniowym samoczynnym rozruchem wiropądowym), którego zadaniem jest doprowadzenie generatora do znamionowej prędkości synchronicznej i utrzymanie go w ruchu na biegu jałowym.



Rys. 3. Układ probierczy i pomiarowy stosowany do badań zdolności łączeniowej aparatury rozdzielczej w zwiarciovni IEL, w którym przeprowadzono sprawdzenie dokładności przetwarzania prądów zwiarciovych przez przekładniki

G – generator zwiarciovym o mocy 31,5 MVA (500 MVA) lub 100 MVA (2500 MVA); M – silnik generatora; P – pilot generator; W – wzbudnica generatora; Rf – zespół rezystorów w obwodzie wzbudzenia; W1, W2 – wyłączniki w obwodzie wzbudzenia; WB – wyłącznik bezpieczeństwa; ZZ – załączniki zwiarciovej; Rz – zespół regulowanych rezystorów; Lz – zespół regulowanych dławików; TR – zespół trzech transformatorów zwiarciovych 3x33,3 MVA ( 3x750 MVA); RT – rezystor 5 kΩ; Ro, Co – układ do regulacji parametrów napięcia powrotnego; BA, BB, BC - boczniki koncentryczne WSM-6000 - Hilo-Test; PA, PB, PC – przekładniki prądowe PL-30/E-1, PL-30/E-2 – Transformex; Uz – dzielniki WN; US – urządzenie sterujące próbą i pomiarami; OB – obiekt badany; ON – nadajnik optoelektroniczny; OO – odbiornik optoelektroniczny; KS – kabel światłowodowy; TR-GEN7t - Transient Recorder typu GEN7t-2 GENESIS rejestrator (14-16 bit, 25 MHz, RAM 200 MB/kanał); PC komputer z oprogramowaniem WinGen.

Energia elektryczna potrzebna do uzyskania żądanych parametrów probierczych uzyskiwana jest, kosztem energii kinetycznej mas wirujących (ok. 45 ton) układu generator-silnik napędowy. Z wałem generatora sprzężona jest mała prądnicą P (tzw. pilot generator), która współpracuje z urządzeniem synchronizującym próby (US). 24-kanałowe urządzenie synchronizujące US wysyła impulsy w odpowiednio wybranej fazy napięcia zasilania i służy do sterowania urządzeniami zwiarciovni. W celu zapewnienia stabilnego przebiegu prądu zwiarciovej stosuje się układ forsowania wzbudzenia oraz koło zamachowe w układzie napędowym wzbudnicy. Do nastawiania prądu probierczego i współczynnika mocy służy zespół dławików powietrznych Lz oraz rezystorów Rz . Parametry probiercze mogą być również zmieniane poprzez odpowiednie połączenie transformatorów zwiarciovych TR i dobór przekładni transformatorów. Transformatory - 3 jednostki 1-fazowe, każda o mocy nominalnej 33,3 MVA i mocy zwiarciovej 750 MVA oraz uzwojeniach 10 kV/15-30-60-120 kV , mogą być różnie kojarzone w układach 3- i 1-fazowych (w sumie można uzyskać kilkadziesiąt różnych przekładni).

Pomiary wykonano w układzie pomiarowym jaki jest stosowany - jak wspomniano wyżej - podczas badań zdolności łączeniowej aparatury, wykonywanych w laboratorium zwiarciovym IEL. Podstawowymi elementami układu są: przetworniki światłowodowe (ON-nadajnik, OO-odbiornik), zespół światłowodów KS, 24 kanałowy Transient Recorder typu GEN7T-2 GENESIS firmy HBM Inc. USA ( wzmacniacz DIF25M128 wejście różnicowe 20 mV-100 V, 14/16 bit, 200MB RAM, próbkowanie 25 Ms/s). Rejestrator poprzez łącze Ethernet jest połączony z komputerem. Obróbka danych, oscylogramów i tworzenie dokumentacji, odbywa się za pomocą autorskiego oprogramowania WinGen. W tle programu WinGen pracuje program Perception (dostarczony przez producenta ) obsługujący rejestrator.

## 6. WYNIKI BADAŃ

Badania przeprowadzono w układzie probierczym 3-fazowym (rysunku 3) przy różnych stałych czasowych obwodu. Dla poszczególnych zakresów wykonano po 2 próby w tym jedną dla wartości prądu bliskiej maksymalnej

danego zakresu, łącznie wykonano ponad 20 prób. Mierzono następujące wielkości: wartość szczytową (udar) -  $I_p$ , wartość skuteczną prądu symetrycznego (1- okres) -  $i_1$ , wartość początkową prądu asymetrycznego -  $I_{d0}$ , współczynnik udaru -  $k$  oraz wartość -  $i^2t$  dla wybranego przedziału. Przykładowe wyniki, dla pomiarów przekładnikiem oraz bocznikiem, wraz z błędami pomiaru zestawiono w tab. 3. Wybrano przypadek nienasycania (oscyllogram nr 96255) i nasycania (oscyllogram 96264) się przekładnika.

Tab. 3. Zestawienie wybranych wyników pomiarów. Stała czasowa obwodu  $\tau = 146$  ms

Przekładnik PL -30/E-2 -zakres 10 kA. Oscyllogram nr 96255			
Mierzona wielkość	Przekładnik	Bocznik	Błąd [ % ]
Wartość szczytowa $I_p$	10,91 kA	10,86 kA	0,46
Wartość skuteczna $i_1$	3,77 kA	3,79 kA	0,26
Współczynnik udaru $k$	2,886	2,885	0,73
Wartość $i^2t$	5,35 MA <sup>2</sup> s	5,39 MA <sup>2</sup> s	0,75
Wartość początkowa składowej nieokresowej $I_{d0}$	5,83 kA	5,85 kA	0,35
Przekładnik PL -30/E-2 – zakres 2 kA. Oscyllogram nr 96264			
Wartość szczytowa $I_p$	9,19 kA	9,25 kA	0,65
Wartość skuteczna $i_1$	3,22 kA	3,25 kA	0,93
Współczynnik udaru $k$	2,863	2,846	0,59
Wartość $i^2t$ *)	1,59 MA <sup>2</sup> s	1,57 MA <sup>2</sup> s	1,26
Wartość początkowa składowej nieokresowej $I_{d0}$	4,80 kA	4,76 kA	0,83

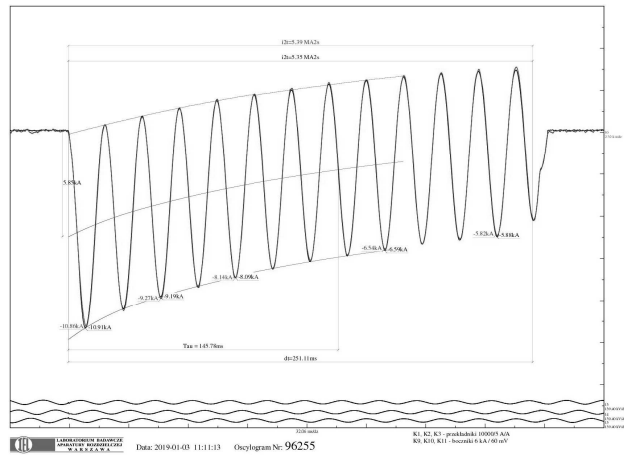
\*) wartość wyznaczona dla czasu  $t = 63$  ms

Na zamieszczonych oscyllogramach zaprezentowano tylko pomiary 1 fazy, tej w której wystąpił najwyższy udar, przebiegi umieszczono na wspólnej osi czasowej – przebieg z bocznika (kolor czerwony) i przebieg z przekładnika (kolor czarny). Gdy wartość mierzonego prądu jest stosunkowo mała, przekładnik mierzy prąd poprawnie w całym rejestrowanym przedziale, mimo, że stała czasowa obwodu przekracza założoną wartość (rysunek 4) - wizualnie przebiegi praktycznie się pokrywają w całym rejestrowanym przedziale. Dla mierzonych wartości bliskich maksymalnych zakresu, przekładnik już mierzy poprawnie (z założonym błędem), tylko w przedziale dla założonej stałej czasowej (60 ms). Można zaobserwować, że po zakończeniu stanów przejściowych przekładnik „wychodzi” z nasycenia – przebiegi zaczynają się pokrywać ( rysunek 5).

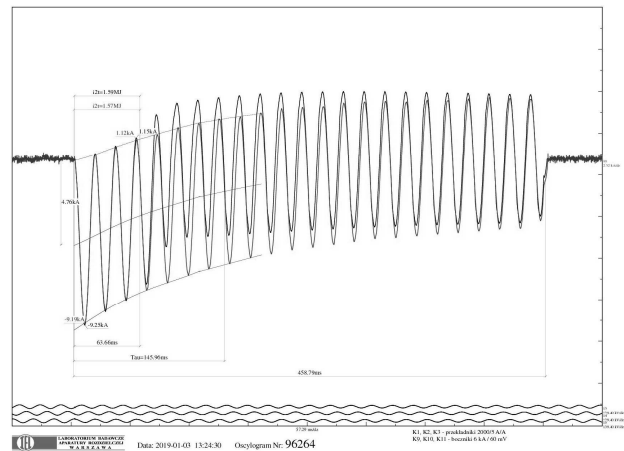
## THE SYSTEM OF MEASUREMENT OF SYMMETRICAL AND ASYMMETRIC SHORT CIRCUIT CURRENT WITH MULTI RANGE CURRENT TRANSFORMERS IN CONDITIONS OF SHORT-CIRCUIT TESTING LABORATORY.

The article contains an overview of various requirements for the parameters of the Short-Circuit Testing Laboratory: symmetrical and asymmetrical short-circuit currents, time constant for the disappearance of the constant short-circuit component, asymmetrical peak factor and various types of short-circuit tests performed on various devices operating in power systems, contained in different subject standards . The equipment of the Short-Circuit Testing Laboratory of the Electrotechnical Institute and the modernized test chamber No. 6 is described, equipped with new multi range current transformers and a modern measuring system for short-circuit current. The method of checking the accuracy of current transformers for measuring short-circuit currents is described and example oscillograms are given. The values of the adopted parameters of the transformers and the way of designing the test track are highlighted, enabling the simplification of preparatory works to carry out short-circuit tests and research organization. The article contains electrical diagrams of measurement systems, diagrams of current transformer windings and photograph of modernized test chamber No. 6.

**Keywords:** short-circuit tests, short-circuit current measurements, current transformer.



Rys. 4. Oscyllogram z próby sprawdzania dokładności pomiarowej przekładników w przypadku braku nasycenia



Rys. 5. Oscyllogram z próby sprawdzania dokładności pomiarowej przekładników w przypadku nasycenia

## 7. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzane badania i pomiary prądu zwarciegowego w laboratorium zwarciovym IEL, za pomocą wielozakresowych przekładników prądowych, potwierdziły poprawność rejestracji przebiegów w granicach założonych parametrów. Układ pomiarowy został wdrożony i jest eksploatowany. Poprawiły się parametry eksploatacyjne zwarciovni, wzrosła jakość wykonywanych pomiarów, zdecydowanie skrócił się czas przygotowania układów probierczych do badań.