

J. Skubis, Z. Ranachowski
T. Boczar, M. Lorenc

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA
METODY WZORCOWANIA HSU-NIELSENA
W UKŁADACH DO POMIARU EA
OD WYLADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

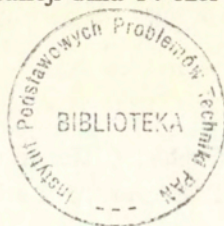
20/1994

P. 269



WARSZAWA 1994

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 14 czerwca 1994 r.



56629



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 2,0 Ark. druk. 2,5
Oddano do drukarni w lipcu 1994 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul. Jasna 1

Jerzy Skubis
Wyższa Szkoła Inż. Opole

Zbigniew Ranachowski
IPPT PAN

Tomasz Boczar
Wyższa Szkoła Inż. Opole

Marcin Lorenc
Wyższa Szkoła Inż. Opole

Analiza możliwości wykorzystania metody wzorcowania Hsu-Nielsena w układach do pomiaru EA od wyładowań niezupełnych.

Streszczenie

Tematem pracy jest analiza możliwości zastosowania metody wzorcowania Hsu-Nielsena do pomiaru EA od wyładowań niezupełnych. W pierwszej części przedstawiono ideę oraz sposób przeprowadzania wzorcowania umożliwiające prawidłową kalibrację toru pomiarowego. Druga część zawiera badania eksperymentalne, które obejmowały wzorcowanie dwóch różnych analizatorów emisji akustycznej, Izoldy oraz Demy 34. Na koniec przedstawiono uwagi praktyczne umożliwiające prawidłowe kalibrowanie układów w warunkach technicznych.

1. Problemy wzorcowania układów pomiarowych rejestrujących zjawisko EA - zdefiniowanie zagadnienia.

Zjawisko emisji akustycznej znane jest od wieków, ale jako metoda pomiarowa znalazła praktyczne zastosowanie w latach sześćdziesiątych. To właśnie w tym okresie wprowadzono termin emisja akustyczna. Pod tym pojęciem rozumie się zjawisko polegające na powstawaniu fal sprężystych wewnątrz lub na powierzchni ośrodka. Obecnie pojęcie emisja akustyczna nie jest

całkowicie ściśle, ponieważ sygnały rejestrowane tą metodą mieszczą się w przedziale od infradźwięków do ultradźwięków. W ostatnich latach obserwuje się bardzo dynamiczny rozwój metody EA. Głównym czynnikiem wpływającym na postęp w pomiarach EA jest doskonalenie metod pomiarowych jak również poszerzenie znajomości procesów fizycznych towarzyszących generacji i propagacji sygnałów akustycznych. W metrologii EA nie jest możliwe dokonanie pomiarów absolutnej wielkości mierzonych sygnałów EA w miejscu ich generacji. Powodem tego jest to, że źródła sygnałów znajdują się najczęściej wewnątrz badanego obiektu, stąd sygnał dochodzący do przetwornika jest tłumiony i podlega wielokrotnym odbiciom. Ponadto ośrodek sprzęgający przetwornik z badanym obiektem wprowadza także tłumienie trudne do zmierzenia. Nie jest też bez znaczenia układ pomiarowy, który sam w sobie wprowadza pewną nieoznaczoność i zmiany sygnału rejestrowanego w stosunku do sygnału pierwotnego. Z tych to powodów w praktyce nie stosuje się pomiarów bezwzględnych, nie rezygnując przy tym z pomiarów ilościowych EA opartych na pomiarach względnych. Pomiary ilościowe polegają na porównaniu badanych sygnałów z sygnałami wzorcowymi generowanymi za pomocą sztucznych źródeł dźwięku. W praktyce metrologicznej dąży się do tego aby impulsy sygnału wzorcowego były jak najbardziej zbliżone do idealnych, nierealizowalnych fizycznie, ale mimo to często wykorzystywanych jako abstrakcyjne modele fluktuacyjnych sygnałów fizycznych [28]. Sygnały o charakterze impulsowym powinny odpowiadać "delcie Diraca", a sygnały typu szumowego "szumowi białemu".

2. Źródła wzorcowe emisji akustycznej

Złożoność sygnału EA sprawia, że zasadniczo każdy rzeczywisty obiekt generuje odmienny sygnał emisji akustycznej dlatego też konstruowane są różnorodne źródła generujące powtarzalne sygnały wzorcujące. Ze względu na czas trwania i

kształt generowanego sygnału, źródła wzorcowe EA można podzielić na dwa typy: impulsowe oraz szumowe [21]. Spośród obecnie znanych źródeł wzorcowych typu "burst" należy wymienić:

1. Test Hsu-Nielsena [9, 15],
2. Pobudzenie iskrą elektryczną [10],
3. Łamanie cienkiej szklanej kapilary [6],
4. Zrzucanie stalowej kulki na badany obiekt [29],
5. Układ rurowy modelujący jednokierunkowe pole akustyczne [27].

Do drugiej grupy zalicza się następujące metody:

1. Generacja fali ciepła przy punktowym nagrzewaniu [1],
2. Pobudzanie impulsem laserowym [11],
3. Wyływ gazu z dyszy [13],
4. Rozkruszanie próbki z węgliku krzemu [24],
5. Niszczenie próbki w procesie korozji naprężeniowej [2],
6. Wywołanie przejścia fazowego w stopie Au-47.5 % Cd [7],
7. Generacja fali powierzchniowej [14],
8. Pobudzanie przetwornikiem piezoelektrycznym lub elektromagnetycznym [12].

Analizując możliwości praktycznego wykorzystania w/w metod generacji wzorcowego sygnału EA należy zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- powtarzalność procesu generacji sygnału,
- koszt wykonania źródła sygnału,
- praktyczne możliwości wykorzystania w warunkach technicznych,
- sposób pomiaru parametrów emitowanego sygnału,
- podobieństwo otrzymywanych sygnałów wzorcowych z odpowiadającymi im sygnałami idealnymi.

Kierując się powyższymi kryteriami autorzy pracy przeprowadzili wzorcowanie dwóch różnych torów pomiarowych wykorzystując źródło Hsu-Nielsena. Określono także przebiegi czasowe sygnału wywołanego przez zrzucenie metalowej kulki na stalową płytę.

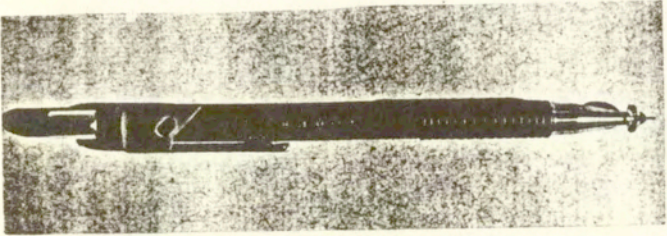
3. Idea wzorcowania układów pomiarowych źródłem sztucznym Hsu-Nielsena

3.1. Idea metody

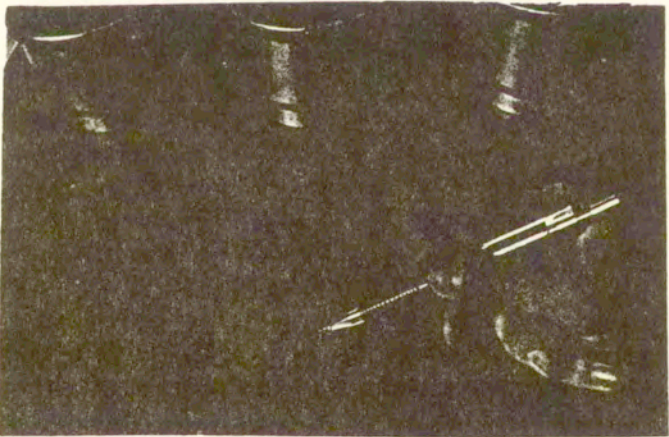
W technice pomiarowej wykorzystującej zjawisko emisji akustycznej istnieje problem wzorcowania układów pomiarowych. Wynika to z konieczności wytworzenia powtarzalnego sygnału akustycznego przy pomocy źródła sztucznego, które umożliwiłoby prawidłowe wzorcowanie poszczególnych torów pomiarowych. Praktyczną metodą wzorcowania, która spełnia wymagania powtarzalnego sygnału akustycznego typu "burst" (impulsowego) jest metoda Hsu-Nielsena. Jest ona łatwa i prosta w zastosowaniu praktycznym, nie wymaga wykorzystania skomplikowanej aparatury pomocniczej ani szkolenia osób wykonujących pomiary. Koszt tej metody sprowadza się do wykonania odpowiedniej głowicy wzorcującej, ołówka automatycznego i rysików o twardości 2H i grubości 0.5mm.

3.2. Sposób przeprowadzania wzorcowania.

Sygnał akustyczny w metodzie Hsu-Nielsena generowany jest w wyniku złamania delikatnego pręcika grafitowego osłoniętego przez odpowiednio przystosowaną końcówkę, nakładaną na automatyczny ołówek o średnicy wkładu 0.5mm. Głowica oraz wysunięcie rysika na odległość 3mm zapewnia zachowanie tego samego kąta przy każdorazowym złamaniu (30°), a tym samym wytworzenie powtarzalnej fali akustycznej. Każdorazowy pomiar sygnału otrzymanego w wyniku kruszenia grafitu, umożliwia powtarzalne wzorcowanie toru pomiarowego. Posiadając źródło, w którym w sposób sztuczny i powtarzalny wzbudza się emisja akustyczna, można prawidłowo przeprowadzić wzorcowanie układu pomiarowego, a tym samym otrzymać miarodajne wyniki pomiarowe. Na rys.1 i 2 przedstawiono układ przygotowany do wzorcowania oraz sposób w jaki przeprowadza się wzorcowanie [5, 3].



Rys.1. Ogólny widok układu Hsu-Nielsena

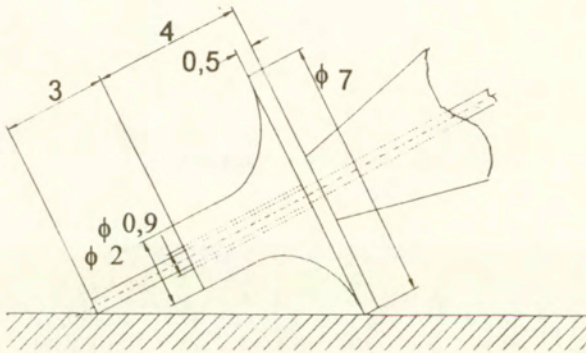


Rys.2 .Układ Hsu-Nielsena przygotowany do wzorcowania.

4. Projekt i wykonanie głowic wzorcujących

4.1. Projekt głowicy

Model głowicy wzorcującej został zaczerpnięty z normy francuskiej, zgodnej z zaleceniami Hsu-Nielsena [23]. Szkic głowicy wzorcującej przedstawiono na rys. 3. Stanowił on podstawę do wykonania serii głowic wykorzystywanych do badań eksperymentalnych stanowiących treść niniejszej pracy.



Rys.3 Szkic głowicy wzorcującej wykonanej zgodnie z zaleceniami Hsu-Nielsena

4.2. Zagadnienia techniczne związane z wykonaniem serii głowic Hsu-Nielsena.

Końcówka została wykonana z polimetakrylanu metylu (norma zaleca dowolny polimer). Tworzywo to zapewnia trwałość i niezmienność zadanych kształtów i wymiarów głowicy. W normalnych warunkach pracy nie ulega ona odkształceniom plastycznym pod wpływem przyłożonych sił jak i temperatury. Technologia wykonania głowicy polega na wytoczeniu pręta o przekroju kołowym i średnicy 7mm, a następnie na odpowiedniej obróbce mechanicznej na specjalistycznej tokarce precyzyjnej. Po nadaniużądanego kształtu i wymiarów głowicy, przewiercono w niej

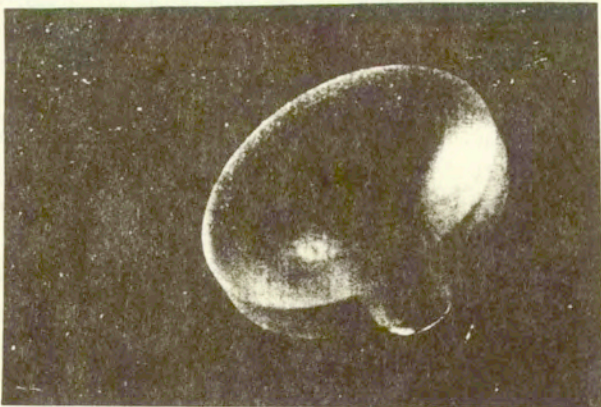
współśrodkowy otwór o średnicy 0.7mm. Otrzymane w ten sposób głowice zostały wykonane z dokładnością 0.1mm [15]. W celu wykonania badań eksperymentalnych i upowszechnianiu metody wykonano serię kilkudziesięciu głowic wzorcujących.

4.3. Przykłady wykonanych głowic.

Ogólny wygląd wykonanych głowic przedstawiono na rys.4 i 5.



Rys.4. Widok wykonanej głowicy wzorcującej z góry powiększonej 10 razy.



Rys.5. Widok wykonanej głowicy wzorcującej z boku powiększonej 10 razy.

5. Prace eksperymentalne

5.1. Wyniki wzorcowania układu do pomiaru wyładowań niezupełnych typu Izolda.

5.1.1. Charakterystyka układu pomiarowego od wyładowań niezupełnych typu Izolda.

Układ pomiarowy typu Izolda produkcji ZZUJ POLON był wyjściowym do konstrukcji układów serii Dema. Podstawową funkcją zestawu jest przetwarzanie wyników badań do postaci danych cyfrowych według wybranego wcześniej programu, segregowanie tych informacji, a następnie rejestracja, umożliwiającą wprowadzenie danych do komputera. Przy pomocy zestawu można rejestrować wyniki jednocześnie z 15-tu kanałów pracujących w tym samym reżimie pracy (w badaniach wykorzystano trzy kanały). Aparatura pomiarowa oraz zestaw sterowania i rejestracji zbudowane są z bloków elektronicznych serii "Standard". Wyniki pomiarów mogą być równocześnie rejestrowane na taśmie perforowanej i drukowane na drukarce (co wykorzystano przy pomiarach). Zestaw Izolda składa się z pięciu podstawowych bloków:

a) Sterownika ST-23 - stanowi on główny panel zestawu. Spełniane przez niego funkcje to odmierzenie odcinków czasowych, włączanie i wyłączenie przeliczników (z ewentualnym kasowaniem), sterowanie transmisją danych na sześciodekadowym display'u (umożliwia on podgląd zawartości dowolnego toru w dowolnym przeliczniku lub rejestrze czasu rzeczywistego) oraz przesyłanie danych do urządzeń peryferyjnych i sterowanie ich pracą. [19]

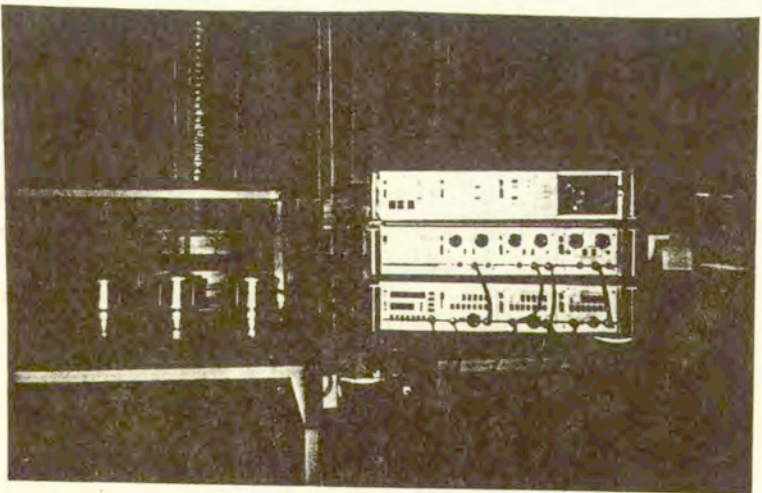
b) Przelicznika 3-kanałowego P-23 - służy on do zliczania w zadanym czasie impulsów z trzech niezależnych torów

c) Analizatora A-22 - przeznaczony on jest do wzmacniania impulsów, określania ich rozkładu amplitudowego oraz ich standaryzacji. Analizator A-22 może pracować w jednym z dwu rodzajów pracy. W pierwszym przypadku możliwy jest niezależny wybór i regulacja dolnego i górnego progu dyskryminacji, natomiast w drugim przypadku możliwe jest ustawienie położenia środka okna dyskryminacji oraz jego szerokości [16],

d) Przelicznika P-21 - służy on do zliczania w zadanym czasie impulsów doprowadzonych do jednego z dwóch wejść lub do pomiaru czasu przy zliczaniu zadanej liczby impulsów wejściowych. Dodatkowo możliwe jest automatyczne powtarzanie pomiaru bez wyświetlania zliczeń chwilowych. Powyższe możliwości mogą być dowolnie łączone, przez co można dokonywać następujących pomiarów: pomiaru częstotliwości impulsów lub przebiegów periodycznych, pomiaru średniego okresu oraz pracy jako uproszczony integrator [17],

e) Wzmacniacza linearnego WL-21 - przeznaczony on jest do wzmacniania i kształtowania sygnałów pochodzących z detektorów pomiarowych. Umożliwia on skokową zmianę wzmocnienia w przedziale od 10 do 640 V/V przy rezystancji wejściowej $1k\Omega$ i maksymalnej amplitudzie impulsu wejściowego dopuszczalną ze względu na liniowość wzmocnienia 1V [18].

Sygnały były odbierane przetwornikami piezoelektrycznymi stykowymi, które dla lepszego sprzężenia mechano-elektrycznego były umieszczone w specjalnie wykonanych uchwytach mocujących w kształcie walca wyposażonych w magnes trwały. Ogólny widok układu pomiarowego przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Ogólny wygląd układu pomiarowego typu Izolda

5.1.2. Dobór badanego obiektu.

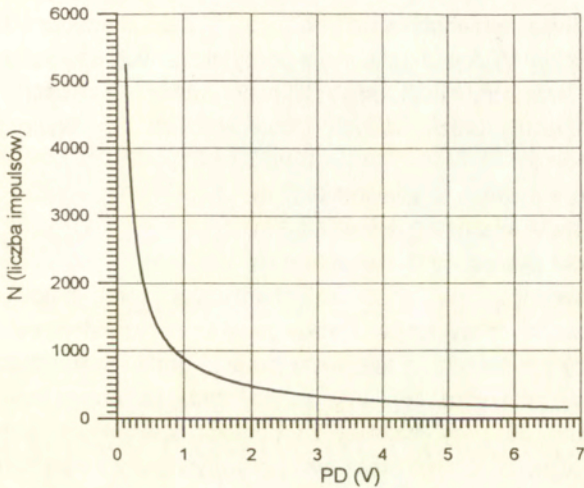
Obiekt, na którym przeprowadzono badania stanowiła stalowa płyta o wymiarach 500 x 500 mm i grubości 0.7 mm. Na płycie pomiarowej nakreślono siatkę, tak aby jej współrzędnymi literowo-cyfrowymi można było określić w sposób jednoznaczny miejsce generacji fal akustycznych emitowanych ze źródła sztucznego Hsu-Nielsena jak również miejsca rozmieszczenia przetworników pomiarowych.

5.1.3. Plan i zakres pomiarów.

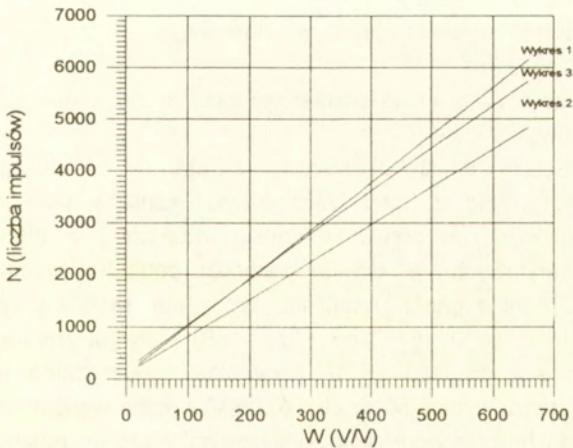
Pomiary przeprowadzono dla: trzech, dwóch i jednego przetwornika piezoelektrycznego, zmieniając punkty łamania rysików dla danego ustawienia detektorów pomiarowych. Dla danej konfiguracji przetworników przeprowadzono łamanie w co najmniej kilku punktach po trzy rysiki na każdy z nich. Wzorcowanie takie wykonano dla trzech różnych ustawień trzech czujników pomiarowych, dla jednej konfiguracji dla dwóch przetworników oraz dla trzech ustawień jednego przetwornika. Ponadto przeprowadzono pomiary dla jednego czujnika, regulując wzmocnienie w całym zakresie przy stałym poziomie progu dyskryminacji. Pomiary te wykonano dla trzech różnych punktów łamania oraz regulację dolnego progu dyskryminacji przy stałym wzmocnieniu dla jednego punktu wzorcowania. Przeprowadzono także próby wzorcowania wykorzystując ołówki automatyczne i rysiki różnych firm. Ogólnie wykonano pomiary dla jedenastu konfiguracji przetworników względem źródeł emisji akustycznej w ten sposób aby z analizy wyników można było wyciągnąć wnioski dotyczące propagacji i tłumienia fal generowanych przez źródło sztuczne Hsu-Nielsena. Przeprowadzone pomiary obejmowały ok. 8000 starannie wykonanych prób wzorcowania.

5.1.4. Analiza uzyskanych wyników

Charakterystyka ilości impulsów EA w funkcji progu dyskryminacji $N=f(ND)$, przy zachowaniu stałej odległości oraz



Rys.7. Zależność liczby impulsów EA od wartości progów dyskryminacji przy stałej wartości wzmocnienia równej 60 dB i odległości pomiędzy przetwornikiem, a punktem wzorcowania wynoszącej 0.2m.



Rys.8. Zależność liczby impulsów EA od wartości wzmocnienia przy stałej wartości progów dyskryminacji równej 0.12 V i różnym odległościom pomiędzy przetwornikiem i miejscem generacji.

wzmocnienia przedstawiona na rys.7, ma charakter krzywej wykładniczej. Wykresy zależności liczby zliczanych impulsów EA w funkcji wzmacnienia $N=f(W)$, przy stałej wartości proggu dyskryminacji oraz stałych odległościach wynoszących odpowiednio:

- dla wykresu nr 1 równej 0.07 m,
- dla wykresu nr 2 równej 0.35 m,
- dla wykresu nr 3 równej 0.21 m,

przedstawionych na rys.8 są charakterystykami liniowymi. Z przedstawionych wykresów wynika, że wraz ze wzrostem odległości pomiędzy detektorem, a miejscem łamania grafitu liczba zliczanych impulsów zmniejsza się. Wynika to stąd, że przetworniki były mocowane do płyty stalowej za pomocą specjalnych uchwytów magnetycznych, których masa była porównywalna z masą badanego obiektu. Odchylenie standartowe amplitudy sygnałów otrzymywanych ze źródła Hsu-Nielsena przy wykonywanych eksperymentach wynosiło od 4 do 8 %.

5.2. Wyniki wzorcowania układu do pomiaru wyładowań niezupełnych typu DEMA-34

5.2.1. Charakterystyka układu pomiarowego.

Wzorcowany układ pomiarowy składał się z następujących elementów:

- analizatora emisji akustycznej DEMA 34 produkcji IPPT składającego się z trzech niezależnych kanałów pomiarowych, przeznaczonych do pomiarów emisji akustycznej w elementach wielogabarytowych, w których zachodzi potrzeba przestrzennej lokacji źródeł sygnału. Analizator umożliwia skokową regulację wzmacnienia od 0 do 60 dB (co 1 dB) i płynną zmianę proggu dyskryminacji od 0 do 5 V. Minimalna dopuszczalna nastawa potencjometru wynosi 50 działek (0.25 V) i może współpracować z różnorodnymi przetwornikami pomiarowymi - szerokopasmowymi i rezonansowymi o częstotliwości odbieranych sygnałów zawierającej się w przedziale 50 kHz do 1 MHz. Analizator DEMA 34 jest przystosowany do współpracy z komputerem za pomocą układu sprzęgającego do transmisji równoległej i szybkości do 1000 bajtów

na sekundę. Może on zliczać impulsy EA od WNZ w dwóch trybach pracy. Pierwszy polega na tym, że trójkanałowy przelicznik zlicza impulsy w jednym z trzech przedziałów czasowych (0.1s; 1s; 10s). Po zakończeniu cyklu pomiarowego informacje te, razem z trzema wartościami parametru A_{RMS} , są transmitowane do komputera. Drugi sposób pracy analizatora, tzn. tryb lokalizacji, polega na tym, że urządzenie oczekuje na sygnał z jednego z trzech kanałów pomiarowych. Po otrzymaniu takiego impulsu, odpowiedni przelicznik jest blokowany, a dwa pozostałe dokonują pomiaru czasu opóźnienia dojścia sygnału. Można w ten sposób określić względne opóźnienie czasowe EA dochodzącej do przetworników, umieszczonych w różnych odległościach od źródła [20, 26].

- przedwzmacniacza niskoszumowego o wzmacnieniu 36 dB i szumie własnym, odniesionym do wejścia, nie większym od $8 \mu V$ RMS,

- przetworników piezoelektrycznych rezonansowych o częstotliwościach rezonansu 150 kHz, 200 kHz i 500 kHz,

- oscyloskopu cyfrowego firmy TEKTRONIX typ 2230. Oscyloskop ten umożliwiał rejestrację z 8 bitową rozdzielczością 1024 punktów przebiegu czasowego badanych sygnałów EA. Dla rejestrowanych sygnałów impulsowych częstotliwość próbkowania wynosiła 5 MHz przy czasie rejestracji $100 \mu s$,

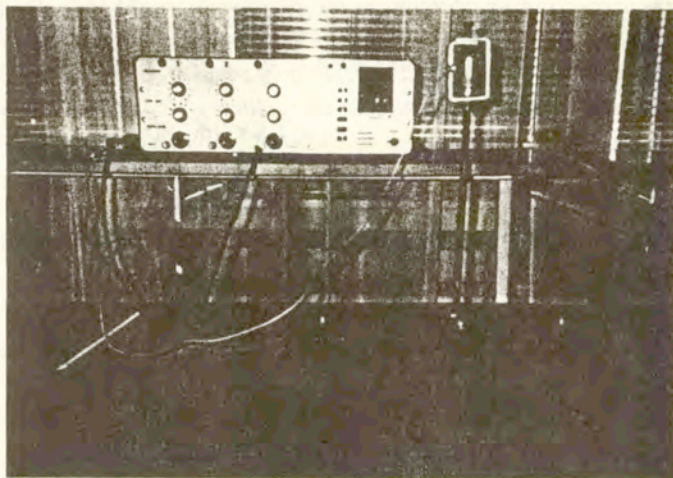
- komputera typu IBM PC AT z oprogramowaniem umożliwiającym zapis i wizualizację przebiegów przesyłanych z oscyloskopu.

5.2.2. Dobór badanego obiektu.

Badany obiekt stanowił fragment rurociągu pary świeżej ze stali 13 HMF o wymiarach 460x135 mm i grubości 80 mm, na którym znajdowała się spoina. Do spoiny dospawano falowód o średnicy 10 mm i długości 300 mm. Na końcu falowodu, w specjalnie wykonanym uchwycie mocującym, umieszczono przetwornik pomiarowy. Ogólny widok wzorcowanego układu pomiarowego i obiektu przedstawia rys.9 [5].

5.2.3. Plan i zakres pomiarów.

Pomiary przeprowadzono w trzech różnych punktach. Punkt A i C znajdowały się w odległości 100 mm od przyspawanego falowodu,



Rys.9. Ogólny widok wzorcowanego obiektu i układu pomiarowego Dema 34.

natomiast punkt B w odległości 200 mm. Badania te wykonano stosując przetwornik piezoelektryczny rezonansowy 500 kHz, regulując wzmocnienie w zakresie od 25 do 35 dB przy stałej wartości progu dyskryminacji równej 0.5 V (100 działek) oraz przy stałym wzmocnieniu wynoszącym 30 dB dla różnych wartości progu dyskryminacji od 0.4 do 0.6 V (80 - 100 działek).

Drugą część pomiarów stanowiło wzorcowanie toru pomiarowego na płaskiej powierzchni stożka, bezpośrednio przy przetworniku. Stożek ten stanowił część konstrukcji sprzęgającej detektor z falowodem. Pomiary wykonano dla dwóch przetworników piezoelektrycznych o rezonansach 200 i 500 kHz, dla różnych wartości progu dyskryminacji od 0.3 do 0.57 V (60 - 114 działek), przy stałym wzmocnieniu wynoszącym 30 dB dla przetwornika 500kHz i 0 dB dla przetwornika 200 kHz. Przeprowadzono także wzorcowanie przy stałej wartości progu dyskryminacji równej 0.25 V (100 działek) regulując poziom wzmocnienia od 25 do 35 dB dla przetwornika 500 kHz i od 0 do 5 dB dla przetwornika 200 kHz.

Pomiary wykonano stosując towt jako medium sprzęgające przetwornik z powierzchnią stożka. Wartości progu dyskryminacji i wzmocnienia przy jakich prowadzono badania odpowiadały standartowym nastawom aparatury wykorzystywanej w pomiarach EA i stosowanej podczas rutynowych badań spoin rurociągów pary świeżej w Elektrowni "OPOLE". Ponadto przeprowadzono wzorcowanie układu, zmieniając wzmocnienie od 20 do 40 dB przy stałej wartości progu dyskryminacji równej 0.25 V dla przetwornika 500 kHz, stosując następujące media sprzęgające:

- towt,
- powietrze,
- woda,
- olej transformatorowy.

Trzecią część pomiarów stanowiło badanie zależności liczby odbieranych impulsów od wartości siły dociskającej przetwornik pomiarowy do powierzchni stożka. Pomiary przeprowadzono dla czujników 200 i 500 kHz przy wzmocnieniu równym 30 dB i progu dyskryminacji wynoszącym 0.25 V [4, 5].

Ostatni etap badań stanowiła rejestracja przebiegów czasowych przy nastawach: podstawy czasu równej 20 ms i przełącznika zakresu 2V/dz. na oscyloskopie cyfrowym TEKTRONIX.

Pomiary wykonano dla przetworników 150 i 200 kHz przy wartości progu dyskryminacji 0.5 V i wzmocnieniu 10 dB na DEMIE 34. Badany obiekt stanowiła stalowa płyta wykorzystana w pomiarach opisanych w punkcie 5.1., natomiast detektory umieszczono bez dodatkowych uchwytów mocujących bezpośrednio na niej. Badania miały na celu określenie na podstawie otrzymanych oscylogramów wpływu różnych mediów sprzęgających oraz grafitów różnych firm na wielkość i charakter wzorcowych impulsów . Ponadto dla porównania wykonano rejestrację przebiegów czasowych dla trzech metalowych kulek o masach: $m_1 = 0.26$ g, $m_2 = 0.89$ g, $m_3 = 4.11$ g. Kulki zrzucano z wysokości 0.3 m, a odległość pomiędzy detektorem EA i miejscem generacji sygnału wynosiła 0.3 m. Początkowe energie potencjalne poszczególnych kulek wynosiły: $E_1 = 0.76$ mJ, $E_2 = 2.62$ mJ, $E_3 = 12.09$ mJ. Sygnały odbierano przetwornikiem piezoelektrycznym rezonansowym 200 kHz przy nastawach: na analizatorze Dema 34 PD = 1 V, W = 10 dB, na

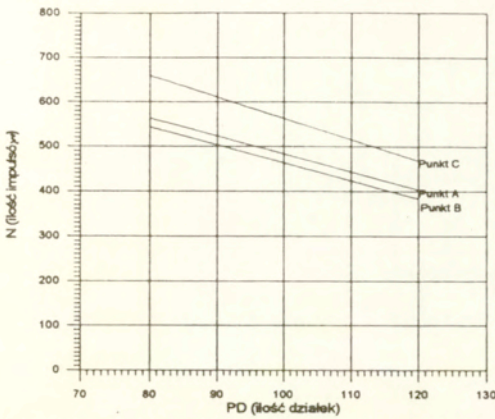
oscyloskopie cyfrowym TEKTRONIX. podstawy czasu równej 20 ms i przetwornika zakresu 1 V/dz.

5.2.4. Analiza uzyskanych wyników.

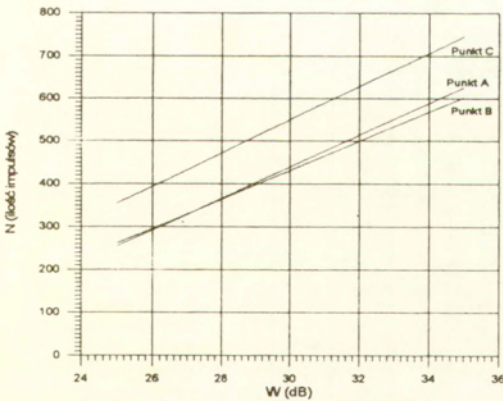
Uzyskane wyniki wzorcowania przedstawiają charakterystyki (rys. 10 - 16). Wartości przedstawione na wykresach stanowią średnią arytmetyczną trzech serii pomiarowych, po dziesięć pomiarów na każdą z nich. Wartości wyraźnie odbiegające od średniej dla danej serii były odrzucane. Wyznaczono następujące zależności: $N=f(PD)$; $N=f(W)$; $N=f(M)$; $N=f(F)$ gdzie :

- N- liczba impulsów EA,
- W- wzmacnienie,
- M- medium sprzęgające,
- F- siła docisku.

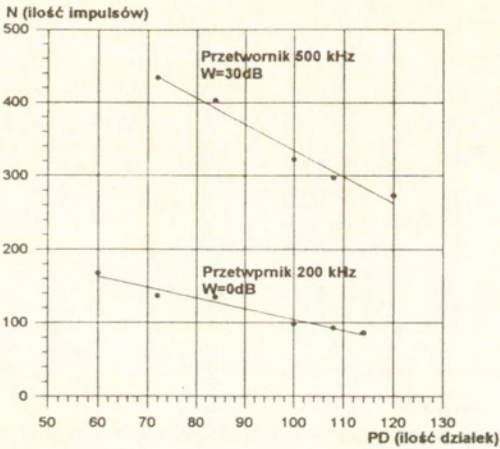
Rys.10 przedstawia wykres zależności $N=f(PD)$ przy stałej wartości wzmacnienia równej 30 dB dla przetwornika 500 kHz, dla trzech różnych punktów generacji impulsów wzorcowych. Zależność liczby impulsów EA odbieranych przez przetwornik w funkcji progu dyskryminacji jest liniowa. Zwiększenie progu dyskryminacji o 125 mV powoduje zmniejszenie liczby zliczanych impulsów średnio o 100. Charakterystyka $N=f(W)$ przy stałej wartości progu dyskryminacji $PD=0.25$ V przedstawiona na rys.11, jest zależnością liniową. Zwiększenie wzmacnienia W o 3 dB powoduje średnio zwiększenie o 100 liczby odbieranych impulsów EA. Z charakterystyk na rys.10 i 11 wynika, że zmiana odległości punktu wzorcowania względem miejsca umocowania falowodu nie powoduje znaczących zmian liczby impulsów EA odbieranych przez przetwornik. Rys. 12 przedstawia wykresy zależności $N=f(PD)$ przy stałej wartości wzmacnienia. Otrzymane charakterystyki są liniowe. Dla przetwornika 200 kHz, zwiększenie progu dyskryminacji o 150mV powoduje zmniejszenie liczby impulsów EA o 50, natomiast dla przetwornika 500 kHz zwiększenie progu dyskryminacji o 150mV powoduje zmniejszenie liczby impulsów o 100.



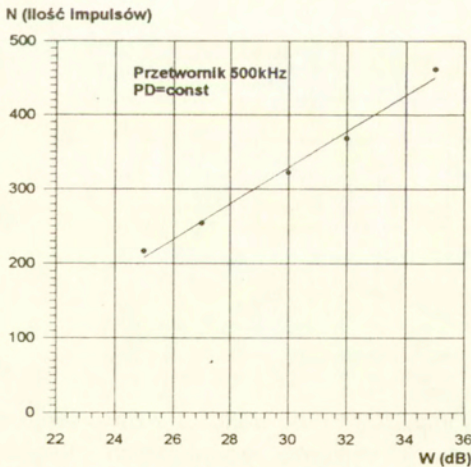
Rys.10. Zależność liczby rejestrowanych impulsów EA od wartości progu dyskryminacji, w różnych punktach generacji impulsów wzorcujących. Sygnały odbierane przetwornikiem o częstotliwości rezonansu 500 kHz.



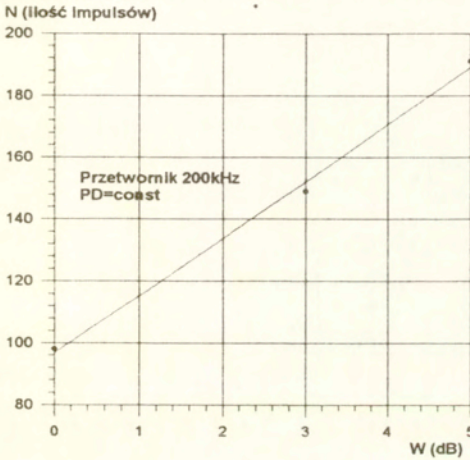
Rys.11. Zależność liczby impulsów EA od wartości wzmacnienia, w różnych punktach generacji impulsów wzorcujących. Sygnały odbierane przetwornikiem o częstotliwości rezonansowej 500 kHz



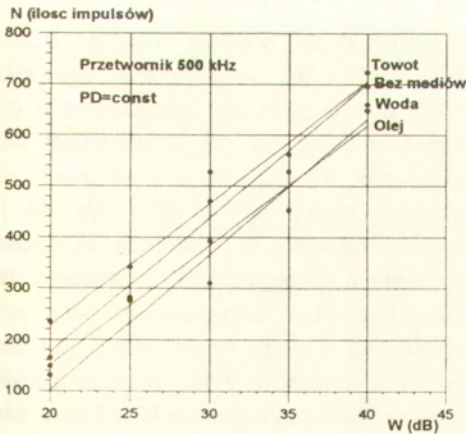
Rys.12. Zależność liczby impulsów EA od wartości progu dyskryminacji, przy wzorcowaniu układu na stożku pomiarowym. Sygnały odbierane przetwornikami o częstotliwości 200 kHz i 500 kHz.



Rys.13. Zależność liczby impulsów ea od wartości wzmocnienia, przy wzorcowaniu układu na stożku pomiarowym. Sygnały odbierane przetwornikiem o częstotliwości rezonansowej 200 kHz.

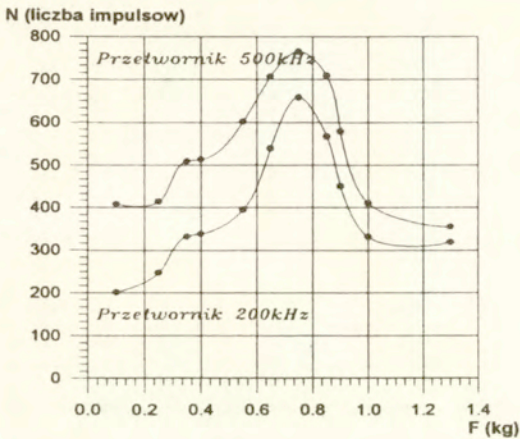


Rys.14. Zależność liczby impulsów EA od wartości wzmacnienia, przy wzorcowaniu układu na stożku pomiarowym. Sygnały odbierane przetwornikiem o częstotliwości rezonansowej 500 kHz.



Rys.15. Zależność liczby impulsów EA od wartości wzmacnienia, dla różnych mediów sprzęgających przetwornik ze stożkiem falowodu.

Sygnały odbierane przetwornikiem o częstotliwości rezonansowej 500 kHz.

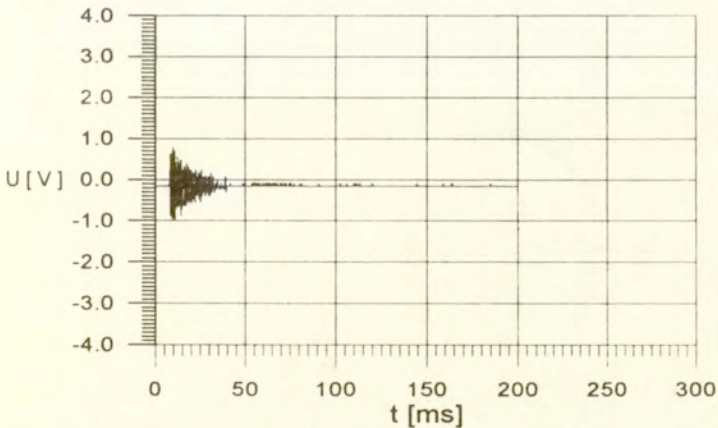


Rys.16. Zależność liczby impulsów EA od wartości siły docisku. Sygnały odbierane przetwornikiem o częstotliwości rezonansowej 200 i 500 kHz, przy stałym wzmacnieniu i progu dyskryminacji.

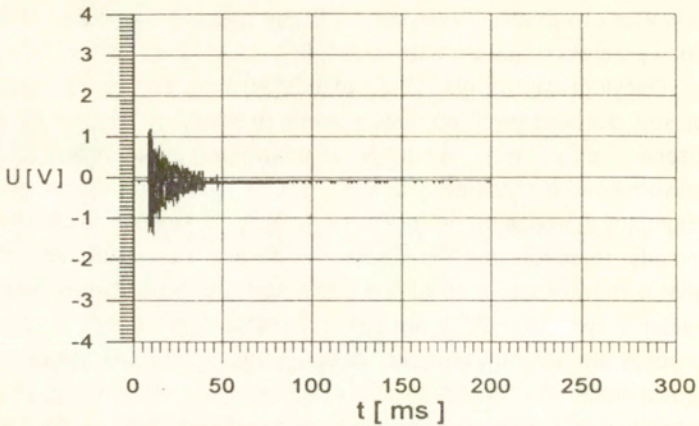
Charakterystyki $N=f(W)$ przy stałej wartości $PD = 0.25V$ przedstawiono na rys. 13 i 14. Dla przetwornika 200 kHz zwiększenie wzmacnienia W o 1dB powoduje zwiększenie o 40 liczbę rejestrowanych impulsów EA (rys. 13), natomiast dla przetwornika 500 kHz zwiększenie wzmacnienia o 1 dB powoduje zwiększenie liczby rejestrowanych impulsów o 30 (rys. 14). Charakterystyka przedstawiona na rys. 15 potwierdza słuszność zastosowania towotu jako medium sprzęgającego przetwornik ze stożkiem. Zastosowanie innych mediów sprzęgających, przy tych samych wartościach wzmacnienia i progu dyskryminacji, dawało mniejszą liczbę rejestrowanych impulsów. Rys. 16 przedstawia wykresy zależności liczby rejestrowanych impulsów N w funkcji siły docisku F dla przetworników 200kHz i 500 kHz. Jako medium sprzęgające stosowano powietrze, ponieważ przy zastosowaniu towotu zwiększanie siły docisku powodowało zmianę grubości warstwy sprzęgającej, a tym samym nie zapewniało tych samych warunków pomiarowych podczas wzorcowania. Z porównania

zapewniała otrzymanie maksymalnej liczby zliczanych impulsów EA dla obu przetworników pomiarowych [5].

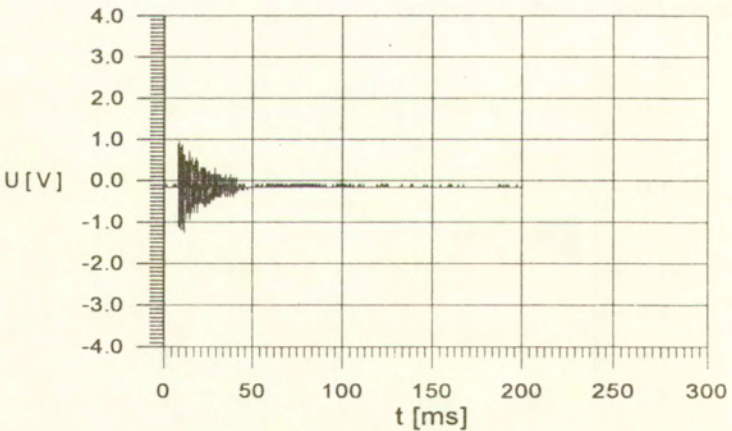
Oscylogramy na rys. 17-22 przedstawiają przebiegi czasowe impulsów pochodzących od wzorcowania przy użyciu metody Hsu-Nielsena, przy tych samych nastawach parametrów dla przetworników akustoelektrycznych: 150 i 200 kHz dla trzech następujących rodzajów wkładów. Z analizy wykresów zależności amplitudy rejestrowanych sygnałów w funkcji czasu wynika, że sygnał o największej amplitudzie otrzymuje się dla wkładów firmy Steadler (rys. 19 i 22) następnie Pentela (rys. 18 i 21), a najslabszy dla wkładów produkcji czeskiej (rys.17 i 20). Ocylogramy przedstawione na rys.23-28 obrazują wpływ różnych mediów sprzęgających przetwornik pomiarowy z powierzchnią badanego obiektu na amplitudę rejestrowanych sygnałów pochodzących od łamanych rysików. Dla tych samych wartości nastawionych parametrów pomiarowych czasy trwania impulsów odbieranych przez przetworniki 150 i 200 kHz są porównywalne, natomiast różnice między sumą EA sygnałów



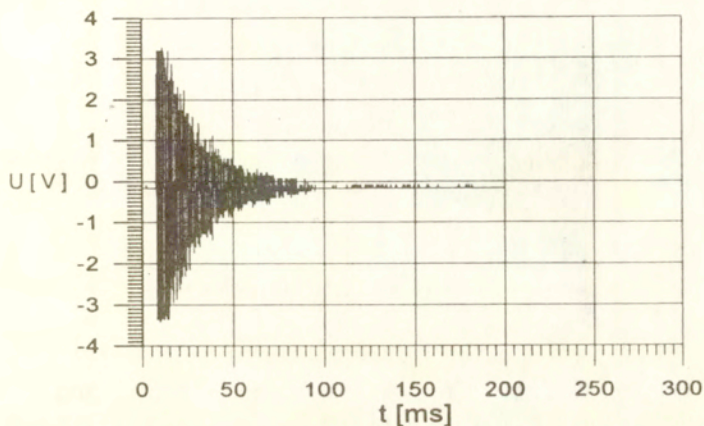
Rys.17. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsena przy zastosowaniu rysika produkcji czeskiej. oraz towotu jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 150 kHz.



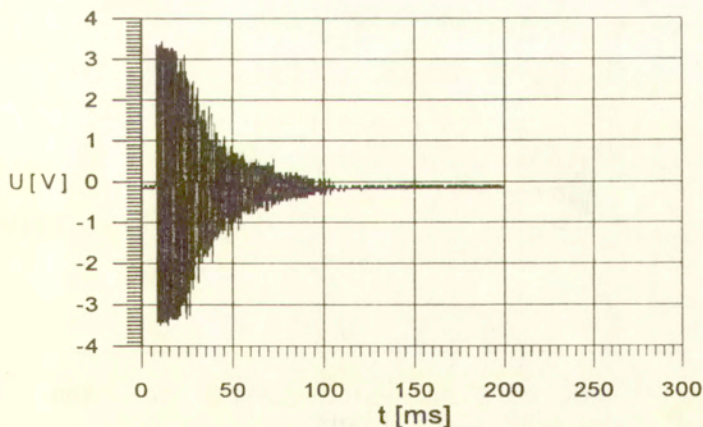
Rys.18. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika firmy Pentel oraz towotu jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 150 kHz.



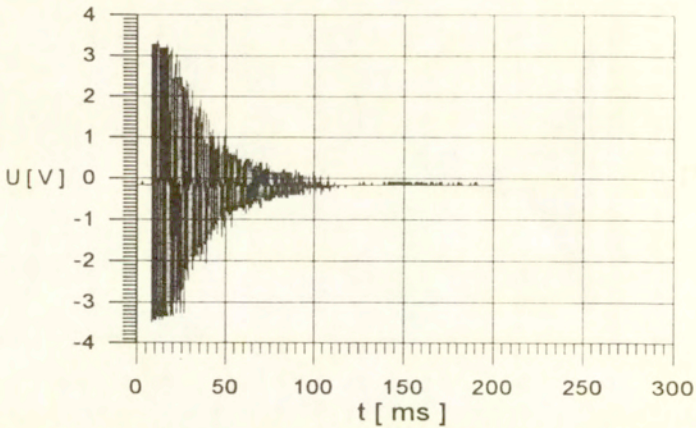
Rys.19. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika produkcji Steadler. oraz towotu jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 150 kHz.



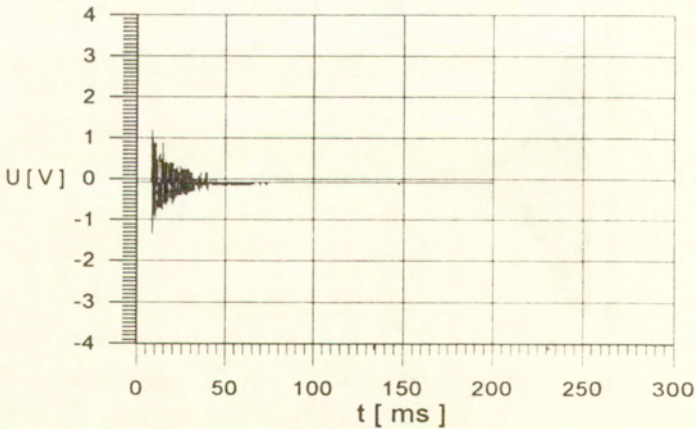
Rys.20. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika produkcji czeskiej, oraz towotu jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 200 kHz.



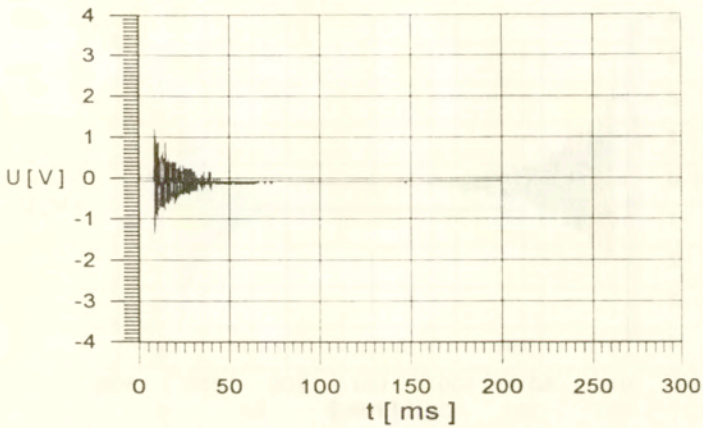
Rys.21. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika firmy Pentel, oraz towotu jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 200 kHz.



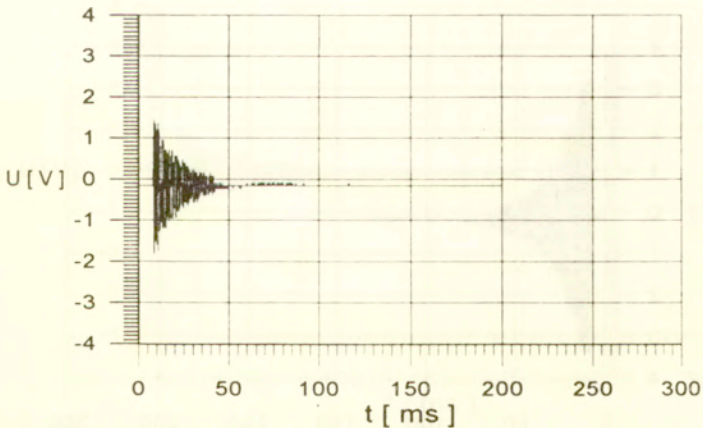
Rys.22. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz towotu jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 200 kHz.



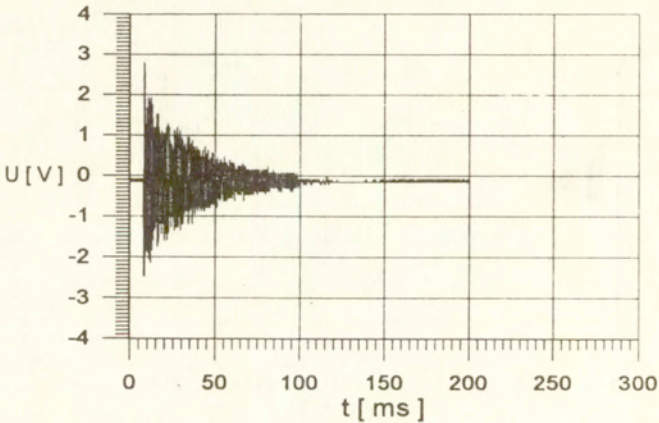
Rys.23. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz wody jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 150 kHz.



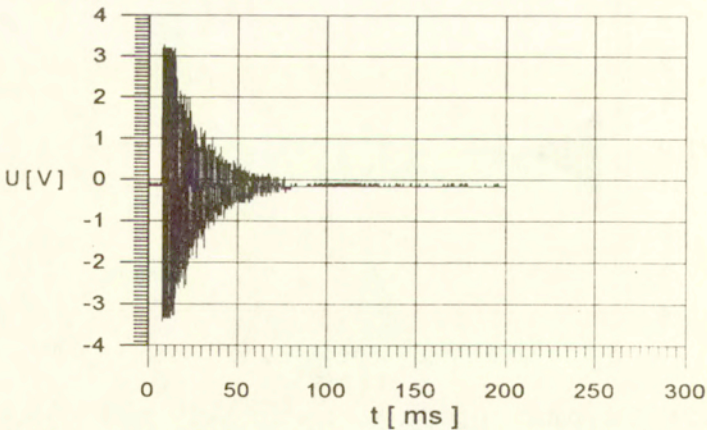
Rys.23. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsena przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz wody jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 150 kHz.



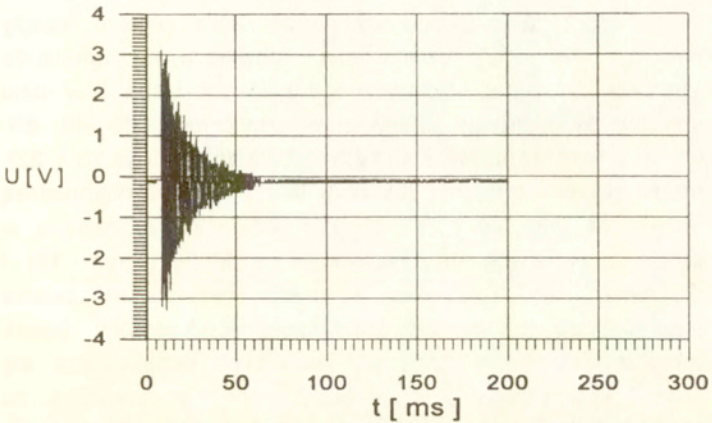
Rys.24. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsena przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz oleju transformatorowego jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 150 kHz.



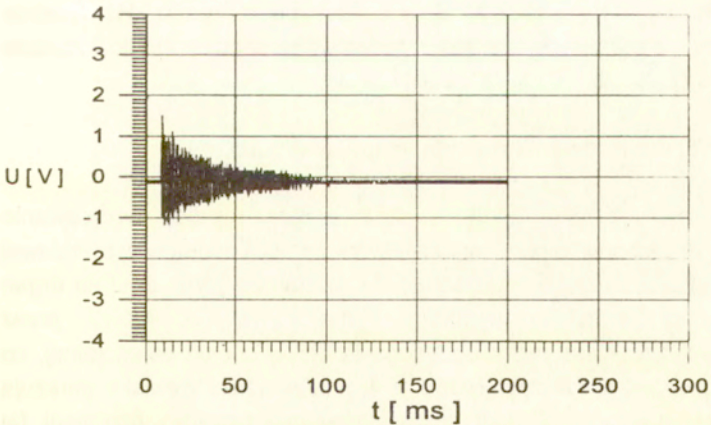
Rys.25. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz powietrza jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 150 kHz. przy wzmacnieniu 40dB



Rys.26. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsen przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz oleju jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 200 kHz.



Rys.27. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsena przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz wody jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 200 kHz.

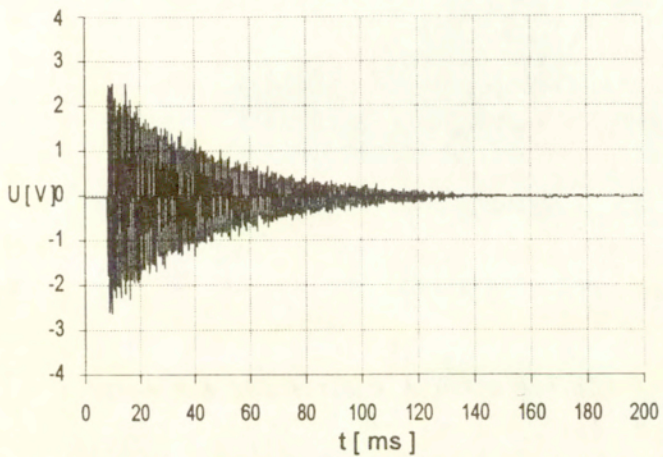


Rys.28. Oscylogram sygnału wzorcującego wg metody Hsu-Nielsena przy zastosowaniu rysika firmy Steadler oraz powietrza jako medium sprzęgające. Sygnały odbierane przetwornikiem 200 kHz, przy wzmacnieniu 40 dB.

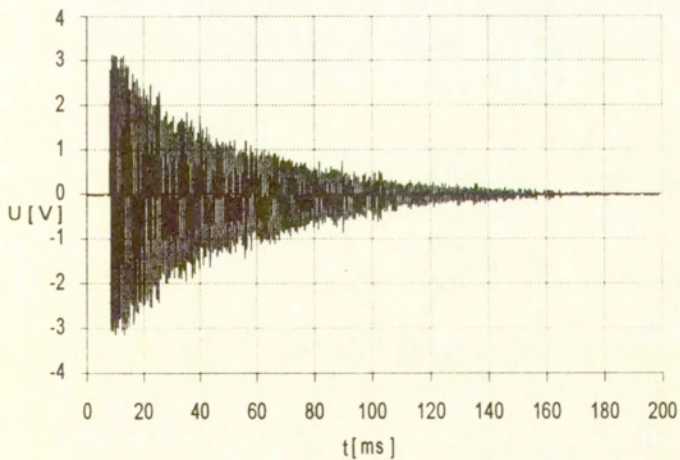
przedstawionych na oscylogramach wynikają z różnicy w tłumieniu w ośrodkach sprzęgających powierzchnie detektora i obiektu. Należy zaznaczyć, że przy sprzężeniu powietrznym amplituda rejestrowanego sygnału akustycznego była tak słaba i w celu otrzymania oscylogramu zwiększono wzmocnienie do 40 dB. Największą wartość sumy EA uzyskano dla towotu (rys.19 i 22), następnie dla oleju (rys. 24 i 26), wody (rys. 23 i 27), a najmniejszą dla powietrza (rys. 25 i 28). Należy podkreślić, że różnica w wynikach otrzymanych na charakterystyce $M=f(W)$ (rys. 15) i oscylogramach mogą wynikać z innego sposobu mocowania przetwornika do powierzchni pomiarowej. Zastosowany docisk mechaniczny wpływa w znaczący sposób na kształtowanie się "poduszki" sprzęgającej. Z przeprowadzonych badań wynika, że najlepsze rezultaty w pomiarach technicznych uzyskuje się stosując towot. Zapewnia on ze względu na swą konsystencję niezmienną styku i stabilność na całej powierzchni. Olej oraz woda rozlewają się po płaskich powierzchniach pomiarowych, a tym samym powodują ciągłą i niekontrolowaną zmianę powierzchni stykowej. Zastosowanie przetwornika 200 kHz umożliwiło rejestrację większej liczby impulsów EA niż przetwornikiem 150 kHz. Średnie czasy wzorcowych impulsów generowanych przez źródło sztuczne Hsu-Nielsen nie przekraczały 100 ms.

5.2.5. Wzorcowanie metodą spadającej kulki.

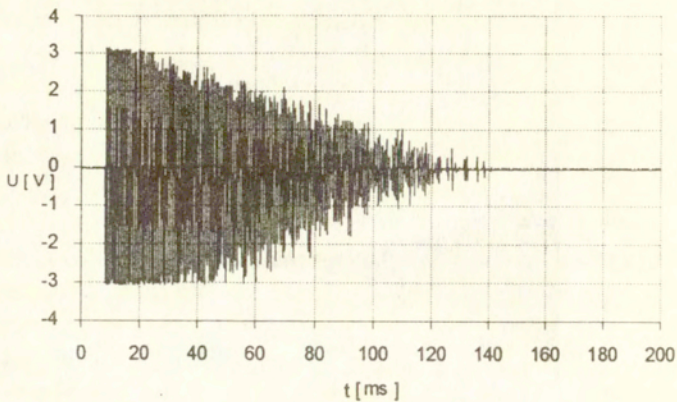
W celach porównawczych przeprowadzono wzorcowanie generując powtarzalne sygnały EA za pomocą spadającej metalowej kulki zrzucanej z wysokości 0.3 m na stalową płytę. Energia drgań mechanicznych przekazywana badanemu obiektowi przez spadającą kulkę jest proporcjonalna do jej energii potencjalnej, co wynika z zasady zachowania energii. Powyższe zjawisko obrazują oscylogramy z rys. 29 - 31, które przedstawiają przebiegi fal akustycznych, od poszczególnych kulek. Obserwując powyższe przebiegi można zauważyć, że im większa jest energia potencjalna kulki (masa) tym czas drgania metalowej płyty jest dłuższy. Czas trwania impulsów generowanych przez uderzającą kulkę jest 2-3 razy dłuższy od sygnału wzorcowego ze źródła Hsu-Nielsen. Suma zliczanych impulsów EA pochodząca od kulki o najmniejszej masie



Rys.29. Oscylogram drgań od kulki metalowej o energii $E_1 = 0.76$ mJ.



Rys.30. Oscylogram drgań od kulki metalowej o energii $E_2 = 2.62$ mJ.



Rys.31. Oscylogram drgań od kulki metalowej o energii $E_1 = 12.09$ mJ.

była najmniejsza i wynosiła 632 impulsy, kulki o masie m_2 była równa 1059, a kulki o masie największej była największa i wynosiła 1211 impulsów EA. Otrzymane wyniki pomiarów sumy EA stanowią średnią arytmetyczną z sześciu przeprowadzonych prób.

6. Uwagi dotyczące sposobu wzorcowania układów do pomiaru wzn w warunkach technicznych.

Układ pomiarowy stosowany w metodzie EA powinien spełniać ogólne wymagania, które stanowią podstawowy warunek dla otrzymania prawidłowych wartości wielkości mierzonych.

Należą do nich:

- staranne wykonanie sprzężenia mechano-elektrycznego między przetwornikiem pomiarowym a powierzchnią badanego obiektu. Literatura podaje sześć różnych możliwości mocowania i sprzężenia przetworników [9]. W pierwszej części prac eksperymentalnych pkt. 5.1. stosowano sprzężenie magnetyczne, a detektory zostały zamocowane w specjalnych uchwytach wykonanych w kształcie walca z aluminium i wyposażonych w magnes trwałe. Stosowanie sprzężenia magnetycznego jest bardzo wygodne dla pomiarów, jednakże ogranicza pasmo pomiarowe ze względu na zjawisko rezonansów pozornych. Ich częstotliwość zależy od kształtu i masy, jak również od wielkości siły nacisku. W drugiej części badań pkt. 5.2. wykorzystano, stosowany w pomiarach na rurociągach pary świeżej w ELEKTROWNI OPOLE, specjalny uchwyt mocujący wyposażony w docisk mechaniczny przetwornika do stożka pomiarowego połączonego z falowodem. Należy pamiętać o tym, że stosując różne sposoby sprzężenia detektora z obiektem badanym mamy do czynienia z różnymi pasmami przenoszenia,

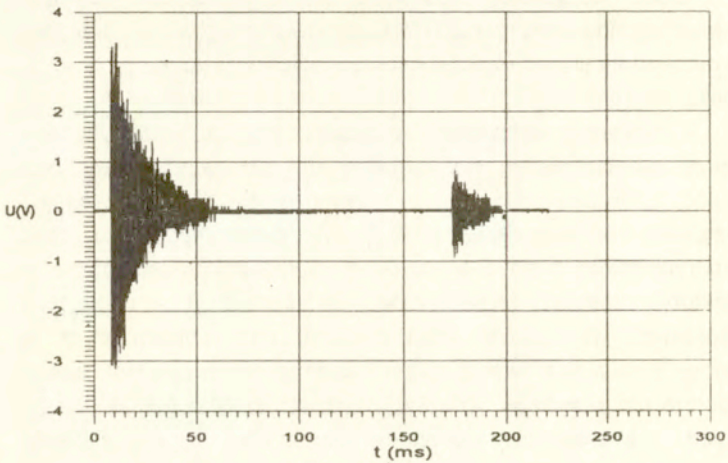
- dokładne ekranowanie całego toru pomiarowego, a w szczególności przewodów, tak aby ich długość nie wpływała na dodatkowe zakłócenia (eliminacja efektu antenowego),

- stosowanie odpowiedniego typu przetwornika pomiarowego, co decyduje o czułości pomiarów, a dalej o interpretacji wyników,

- sprawdzenie ciągłości toru pomiarowego, a w szczególności wszystkich gniazd wtykowych i stosowanych przewodów [25].

Z doświadczeń pomiarowych dotyczących metody Hsu-Nielsenena można wymienić szereg czynników mających wpływ na wyniki pomiarów. W czasie wzorcowania należy uważać aby, łamane rysiki nie ulegały odbiciom od przetworników, a także innych przedmiotów otaczających. Łamane rysiki powracając na powierzchnię pomiarową są źródłem dodatkowego sygnału

akustycznego, sumującego się z pierwotnym sygnałem powstającym w wyniku łamania. Oscylogram tego zakłócenia zamieszczono na rys. 32, na którym oprócz sygnału podstawowego



Rys.32. Oscylogram sygnału wzorcowego wg metody Hsu-Nielsen przy ponownym upadku rysika na metalową płytę.

występują kolejne sygnały przekraczające próg dyskryminacji i zwiększające tym samym liczbę impulsów EA zliczanych przez analizator.

Należy wykluczyć wyniki wyraźnie błędne, spowodowane podwójnym lub wielokrotnym złamaniem się rysika. Na przykład w wypadku skruszenia się rysika otrzymuje się sygnał o natężeniu znacznie przewyższającym średnią z danej serii pomiarowej. Efekt ten jest zwłaszcza widoczny dla rysików gorszej jakości, rzadziej dla stosowanych grafitów firmy Steadtler. Na liczbę generowanych impulsów ea mają także wpływ takie czynniki subiektywne jak np. osoba łamiąca wkład (przy tej samej osobie należy zwracać uwagę na zachowanie stałości siły nacisku używanej w celu złamania grafitu); rodzaj rysików (dla rysików tej samej firmy mogą występować różnice między poszczególnymi wkładami, pudełkami i kartonami); rodzaj ołówka (istnieją różnice pomiędzy poszczególnymi egzemplarzami wyprodukowanymi przez tę samą firmę). Podczas wzorcowania należy dokładnie przestrzegać 3 mm

wysunięcia rysika z głowicy pomiarowej, gdyż tylko wtedy zachowany jest ten sam kąt łamania. Przy wykonywaniu pomiarów należy starać się, aby koniec rysika był płaski na całej powierzchni. W tym celu przed każdorazowym złamaniem wszelkie nierówności winny być usunięte poprzez wyrównywanie na drobnoziarnistym papierze ściernym. Powierzchnia, na której wykonuje się łamanie wkładów musi być dokładnie oczyszczona z wszelkich zabrudzeń, pyłu i substancji tłustych, tak aby istniał bezpośredni kontakt przyłożonego końca łamanego rysika i obiektu. W pomiarach porównawczych wzorcowanie należy wykonać w tym samym punkcie łamana, dla tego jednakowego wzmocnienia i ustalonego wcześniej progu dyskryminacji zapewniającego odstrojenie się od sygnałów zakłócających. Podczas wzorcowania należy zwracać uwagę aby koniec ołówka, z którego bezpośrednio wychodzi grafit, nie wystawał poza głowicę wzorcującą, a pomiary długości wysuniętego rysika należy przeprowadzać od powierzchni czołowej końcówki wzorcującej. W czasie wykonywania pomiarów należy uważać aby nie nastąpiło przesunięcie lub poruszenie przetwornika gdyż ma to bezpośredni wpływ na powierzchnię stykową, a tym samym na wyniki pomiarów. Istnieje możliwość cofania się rysika do prowadnicy ołówka podczas łamania, jak również przy pomiarze wysuwu ze względu na sprężystość mechanizmu wysuwającego grafit z ołówka. Przedstawione wyżej uwagi zredagowano na podstawie doświadczeń metrologicznych, zebranych podczas realizacji pomiarów, których wyniki zawarto w pracach [34, 35]

7. Podsumowanie

W niniejszej pracy omówiono ideę oraz sposób przeprowadzenia wzorcowania przy użyciu źródła sztucznego Hsu-Nielsen. W części eksperymentalnej przedstawiono wyniki prób wzorcowania układów do pomiaru EA od wnz typu Izolda oraz Dema 34. Wykonano także porównawczo wzorcowanie przy użyciu metody spadającej kulki. Na podstawie doświadczeń metrologicznych zdobytych podczas wykonywania pomiarów określono kilka podstawowych uwag umożliwiających prawidłowe wzorcowanie układów w warunkach technicznych. Metoda Hsu-Nielsen odznacza się szczególnymi zaletami zwłaszcza prostotą wykonania oraz

krótkim czasem trwania impulsu co predysponuje ją do szerokiego praktycznego zastosowania w pomiarach emisji akustycznej.

8. Literatura

- [1] Bell R., Acoustic Emission Transducer Calibration - Transient Pulse Method. Technical Report DE-73-3, Dunegan Endevco, San Juan Capistrano, Ca., 1973.
- [2] Birchon D., Dukes R., et al., Some Aspects of Defect Location and Assesment in Pressure Vessels Using Acoustic Emission Technique, 2nd. Int. Conf. on Pressure Vesese Technique, 2, 49, 1973.
- [3] Boczar T., Gronowski B., Lorenc M., Skubis J., Metody wzorcowania układów do pomiaru EA, ZN WSI Opole seria Elektryka, 1994.
- [4] Boczar T., Lorenc M., Wzorcowanie metodą Hsu-Nielsena układów do pomiaru emisji akustycznej, XVI Międzynarodowe Sympozjum Naukowe Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Zielona Góra 1994
- [5] Boczar T., Lorenc M., Wzorcowanie układu pomiarowego na spoinie rurociągu pary świeżej ze stali 13HMF, VI Konferencja Spawalnicza Energetyków, Jarnołtówek, 1993
- [6] Breckenridge F., Tschiegg C., et al., Acoustic Emission: Some Application of Lamb's Problem, JASA, 57, 3, 1975.
- [7] Brown A., Liptai R., Round Robin Testing of Acoustic Emission Source, ASTM STP 505, ASTM Journal, 1972.
- [8] Bruel & Kjaer, Mechanical Vibration and Shock Measurments, 1972.
- [9] Bruel & Kjaer, Technical Review, No 2, 1981.
- [10] Dusek F., et al. The Acoustic Emission Transducer Calibration Using Spark Method, Arch. Acoust., 15, 3-4, 1990
- [11] Egle D., Brown A., A Note on Pseudo-Acoustic Emission Sources. J. of Testing and Evaluation, 4, 3, 1976.
- [12] Fowler K., Papadakis E., Observation and Analysis of Simulated Ultrasonic A. E. Waves in Plates and Complex Structures, Acoustic Emission, ASTM STP 505, ASTM Journal, 1972.

- [13] Green G., Dingwell P., The Use of the Helium Gas Jet in the Analysis of Acoustic Emission Detection Systems, NDT International, 11, 2, 1978.
- [14] Hatano H., Mori E., Acoustic Emission Transducer and Its Absolute Calibration, JASA, 59, 2, 1976.
- [15] Hsu N., Breckenridge F., Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors, Materials Evaluation, 39, 1981.
- [16] Instrukcja obsługi 087-10 Analizator A-22.
- [17] Instrukcja obsługi 090-10 Przelicznik P-21
- [18] Instrukcja obsługi 086-10 Wzmacniacz linearny WI-21
- [19] Instrukcja obsługi, Zestaw centralnej rejestracji dla cyfrowej obróbki danych Izolda
- [20] Instrukcja obsługi, Trzykanałowy analizator EA Dema 34
- [21] Meissner M., Ranachowski Z., Generacja i propagacja wzorcowych impulsów EA, IPPT Warszawa, 1992.
- [22] Meissner M., Ranachowski Z., Modelling of Acoustic Emission Sources, International Journal on Acoustics, Acustica, Vol. 79 Stuttgart, 1993.
- [23] Norma francuska NF - A 09 - 350, Badania nieniszczące, słownictwo wykorzystywane w EA
- [24] Paradee W., Graham L., Frequency Analysis of Two Types of Simulated Acoustic Emissions, JASA, 63, 3, 1978.
- [25] Skubis J., Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, IPPT Warszawa, 1993.
- [26] Skubis J., Jezierski G., Ranachowski J., Pomiar charakterystyk materiałowych i EA złącza spawanego ze stali 13 HMF, IPPT Warszawa, 1992.
- [27] Skubis J., Opis patentowy, Układ do wzorcowania przetworników piezoelektrycznych przeznaczonych do odbioru sygnałów akustycznych od wyładowań elektrycznych, Świadectwo Autorskie nr 200207
- [28] Szabatin J., Podstawy teorii sygnałów, WKiŁ, Warszawa, 1990.
- [29] Hatano H., Quantitative Measurements of Acoustic Emission Related to its Microscopic Mechanisms, JASA, 57, 3, 1975.

SPIS TREŚCI

1. Problemy wzorcowania układów pomiarowych rejestrujących zjawisko EA - zdefiniowanie zagadnienia.....	3
2. Źródła wzorcowe emisji akustycznej.....	4
3. Idea wzorcowania układów pomiarowych źródłem sztucznym Hsu-Nielsena.....	6
3.1. Idea metody.....	6
3.2. Sposób przeprowadzania wzorcowania.....	6
4. Projekt i wykonanie głowic wzorcujących.....	8
4.1. Projekt głowicy.....	8
4.2. Zagadnienia techniczne związane z wykonaniem serii głowic Hsu-Nielsena.....	8
4.3. Przykłady wykonanych głowic.....	9
5. Prace eksperymentalne.....	10
5.1. Wyniki wzorcowania układu do pomiaru wyładowań niezpełnych typu Izolda.....	10
5.1.1. Charakterystyka układu pomiarowego wyładowań niezpełnych.....	10
5.1.2. Dobór badanego obiektu.....	12
5.1.3. Plan i zakres pomiarów.....	12
5.1.4. Analiza uzyskanych wyników.....	12
5.2. Wyniki wzorcowania układu do pomiaru wyładowań niezpełnych typu DEMA-34.....	14
5.2.1. Charakterystyka układu pomiarowego.....	14
5.2.2. Dobór badanego obiektu.....	15
5.2.3. Plan i zakres pomiarów.....	15
5.2.4. Analiza uzyskanych wyników.....	18
5.2.5. Wzorcowanie metodą spadającej kulki.....	30
6. Uwagi dotyczące sposobu wzorcowania układów do pomiaru wz w warunkach technicznych.....	32
7. Podsumowanie.....	34
8. Literatura.....	35