

mgr inż. IGNACY BOJANEK

dr inż. PIOTR KARKOSZKA

Przemysłowy Instytut Automatyki

i Pomiarów MERA-PIAP

Warszawa

STANOWISKO DO BADANIA WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH PRZETWORNIKÓW WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCYCH RUCH OBROTOWY I LINIOWY

W artykule podano zakres i program badań wraz z przykładowym algorytmem badań oraz opisano stanowisko do badania właściwości metrologicznych przetworników pomiarowych.

1. Wprowadzenie

Przetworniki pomiarowe budowane z amorficznych elementów magnetycznych mają stosunkowo niedługą historię, a w związku z tym nie zostały jeszcze rozpowszechnione w technice użytkowej. Ich rozwój wskazuje jednak na to, że w niedługim czasie staną się konkurencyjne dla przetworników działających według innych zasad, między innymi wykorzystujących zjawisko Halla, Gaussa, samoindukcji, indukcji elektromagnetycznej itp., stosowanych w praktyce pomiarowej od wielu lat i mających niejednokrotnie dobrze opracowane podstawy teoretyczne. W przypadku przetworników wykorzystujących zjawiska występujące w magnetycznych materiałach amorficznych, opracowanie jednolitej i spójnej teorii dotyczącej ich działania i wyjaśniającej ich właściwości wymaga jeszcze wiele trudu. Materiały te zostały bowiem odkryte stosunkowo niedawno. Wszelkie hipotezy robocze dotyczące przyczyn powstawania tych zjawisk nie są potwierdzane z odpowiednią dokładnością w praktyce eksperymentalnej. Fakt ten jest podstawową przyczyną konieczności opracowania programu badawczego i pomiarowego pozwalającego na bieżąco badać i weryfikować modele przetworników pomiarowych pod kątem ich właściwości metrologicznych oraz sprawdzać używane do ich budowy materiały magnetyczne.

Istotną trudność podczas opracowywania programu badań nastręcza fakt, że pomiary właściwości magnetycznych materiałów amorficznych wymagają innego podejścia metodologicznego niż pomiary właściwości tradycyjnych materiałów. Powody są następujące:

- bardzo małe wymiary próbek; w przypadku taśm amorficznych – o grubości nie większej niż 50 μm , szerokości do 10 mm i długości do kilkuset mm; w przypadku drutów amorficznych – o średnicy do 200 μm , długości do kilkuset mm,
- niewielkie wypełnienie cewek pomiarowych materiałem badanych próbek,
- właściwości magnetyczne zmieniające się wybitnie pod wpływem zmian naprężeń mechanicznych, temperatury, chemicznego oddziaływania otoczenia itp.,
- duże rozpiętości zakresów zmian mierzonych wielkości magnetycznych wskutek niekiedy minimalnych zmian składu chemicznego stopu amorficznego, zmian rozkładu struktury domenowej lub kształtu próbek.

Pomiary właściwości magnetycznych badanych próbek muszą być z powyższych względów wykonywane w ściśle zdeterminowanych warunkach. Późniejsza użyteczność wyników badań próbek podczas budowy przetworników w dużym stopniu zależy od możliwości odtworzenia warunków pomiarowych w wykonywanych modelach. Dotychczasowe rezultaty prac eksperymentalnych [4, 5, 6] potwierdzają ten aspekt opracowywania przetworników pomiarowych na bazie materiałów amorficznych.

Program badań przetworników obejmuje:

- badanie właściwości magnetycznych materiałów amorficznych używanych w przetwornikach pomiarowych,
- badanie właściwości sygnałów elektrycznych wytwarzanych przez elementy generacyjne przetworników pomiarowych (taśmy i druty z efektem Matteucciego, cewki nawinięte na taśmy i druty z efektem Wieganda lub z silnym efektem Barkhausena, generatory sygnałów elektrycznych z cewkami na taśmach i drutach zeromagnetostrykcyjnych lub same cewki na taśmach i drutach zeromagnetostrykcyjnych),
- badanie właściwości metrologicznych przetworników pomiarowych.

W niniejszym artykule jest przedstawiona tylko część systemu pomiarowego służącego do realizacji przytoczonego programu badań, to jest stanowisko do badania właściwości przetworników pomiarowych.

2. Zakres badań właściwości metrologicznych przetworników pomiarowych.

Przetworniki z amorficznymi materiałami magnetycznymi mogą mierzyć:

- położenie kątowe i liniowe,
- przemieszczenie kątowe i liniowe,
- prędkość kątową i liniową jako pierwsze pochodne przemieszczeń względem czasu,
- przyspieszenie kątowe i liniowe jako drugie pochodne przemieszczeń względem czasu,
- siłę, naprężenia, ciśnienie, moment obrotowy,
- prąd elektryczny stały i zmienny,

- częstotliwość sygnałów elektrycznych,
- natężenie pola magnetycznego.

Zakres zastosowania przetworników z tymi materiałami jest coraz większy. Przemawia za tym fakt szybkiego rozwoju i upowszechniania się techniki pomiarowej wykorzystującej właściwości materiałów amorficznych.

Zakres badań właściwości metrologicznych przetworników pomiarowych jest uzależniony od czynników decydujących o charakterze ich pracy, między innymi od:

- rodzaju i charakteru mierzonej wielkości,
- rodzaju i charakteru sygnałów elektrycznych generowanych przez elementy czujnikowe i cały przetwornik,
- sposobu przetwarzania sygnałów generowanych przez elementy czujnikowe na sygnał wyjściowy.

W trakcie badań uwzględnia się wpływ różnorodnych czynników na jakość działania przetworników pomiarowych, między innymi wpływ:

- natężenia pola przemagnesowującego, w tym: wartości, częstotliwości, amplitudy, kształtu,
- temperatury,
- obciążenia elementów czujnikowych impedancją zewnętrzną,
- kształtu elementów obwodu magnetycznego przetwornika,
- zewnętrznych pól magnetycznych i elektromagnetycznych,
- sposobów przetwarzania sygnałów elektrycznych w układzie elektronicznym przetwornika.

W przypadku przetworników przemieszczeń konieczne są dodatkowe badania następujących wielkości:

- powtarzalność generowania sygnałów elektrycznych podczas wielokrotnych przemieszczeń kontrolowanych elementów w jednym kierunku, przy czym pomiary dotyczą powtarzalności zarówno pojedynczego impulsu jak i serii impulsów,
- powtarzalności generowania sygnałów elektrycznych podczas przemieszczeń kontrolowanych elementów w obu kierunkach na przemian w celu określenia histerezy pomiarowej.

Powtarzalność określaną na podstawie pierwszego z ww. rodzajów pomiarów można oszacować za pomocą współczynnika k_1 :

$$k_1 = \frac{\tau' + \tau}{\tau} \quad /1/$$

gdzie:

- τ' – szerokość przedziału zmian wielkości odniesienia mierzonej względem ściśle określonego punktu odniesienia.
- τ – szerokość impulsu elektrycznego.

Tablica 1. Zestawienie charakterystyk pomiarowych określających właściwości metrologiczne przetworników z amorficznymi elementami magnetycznymi

Lp.	Charakterystyka		Uwagi	
	Wzór	Nazwa wzoru	Nazwy użytych oznaczeń	Objaśnienia dodatkowe
1	2	3	4	5
1	$Y = P_{s,d}(X)$	Charakterystyka przetwarzania elementu amorficznego	Y — sygnał elektryczny generowany przez element X — wielkość mierzona P — funkcja przetwarzania	s — indeks dotyczący charakterystyk statycznych d — indeks dotyczący charakterystyk dynamicznych
2	$Z = PP_{s,d}(Y)$	Charakterystyka przetwarzania badanego przetwornika	Z — sygnał elektryczny generowany przez badany przetwornik PP — funkcja przetwarzania określająca badany przetwornik	
3	$C_s = f(\Delta Y/\Delta X, X)$	Charakterystyka czułości elementu amorficznego		$\Delta Y/\Delta X$ — pochodna różnicowa sygnału Y względem sygnału X
4	$C_D = f(dY/dX, X, f)$	Charakterystyka czułości elementu amorficznego	f — częstotliwość wytwarzania sygnału Y	$\Delta Z/\Delta X$ — pochodna różnicowa sygnału Z względem sygnału X dY/dX — pochodna sygnału Y względem sygnału X dZ/dX — pochodna sygnału Z względem sygnału X
5	$C_{ps} = f(\Delta Z/\Delta X, X)$	Charakterystyka czułości badanego przetwornika		
6	$C_{pd} = f(dZ/dX, X, f)$			

ciąg dalszy tablicy 1

1	2	3	4	5
7	$Z_{tr} - Z_{pm} = f_{s,d}(X)$	Charakterystyka błędu nielineowości badanego przetworznika	Z_{tr} – teoretyczna wartość sygnału wyjściowego odpowiadająca wartości wielkości mierzonej X Z_{pm} – stwierdzona wartość sygnału wyjściowego odpowiadająca wartości wielkości mierzonej	
8	$k_1 = f(f)$	Charakterystyka powtarzalności generowania impulsów pierwszego rodzaju		
9	$k_2 = f(f)$	Charakterystyka powtarzalności generowania impulsów drugiego rodzaju		
10	R_s	Rozdzielczość statyczna pomiaru wielkości X		
11	$R_d = f(f)$	Rozdzielczość dynamiczna pomiaru wielkości X		
12		Charakterystyki opisowe przetworników pomiarowych		

$$Z_{tr} = \frac{Z_k - Z_p}{X_k - X_p} (X - X_p) + Z_p - \text{df.}$$

wartości teoretycznej Z_{tr} .

We wzorze oznaczono przez p indeks wartości początkowej zakresu zmian sygnału Z, a przez k indeks wartości końcowej.

Tablica 2. Program badań przetworników pomiarowych z amorficznymi elementami magnetycznymi na stanowisku badawczym

STRUKTURA PROGRAMU	UWAGI
<p style="text-align: center;">1</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p style="text-align: center;">ZESTAWIENIE BADANYCH PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p style="text-align: center;">PRZYGOTOWANIE BADAN</p> <p>Wybór przetwornika do badań. Określenie charakterystyki opisowej przetwornika. Przygotowanie części mechanicznej stanowiska do badań przetwornika na podstawie jego charakterystyki opisowej. Przygotowanie komputerowego programu badań przetwornika do uruchomienia i określenie postaci prezentacji wyników badań.</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">PRZYGOTOWANIE PROCESU POMIAROWEGO</p> <p>Ustawienie warunków pomiarów. Ustawienie zakresu zmian wymuszeń i wybór ich wartości ze wspomnianego zakresu zmian. Ustalenie kolejności zadawanych wymuszeń. Wybór sposobu prezentacji wyników pomiarów i określenie parametrów opisujących postać prezentacji wyników pomiarów.</p> </div>	<p style="text-align: center;">2</p> <p>Zaplanowanie rozmieszczenia modułów i zespołów wymiennych. Dobór zakresów zmian wielkości mierzonych.</p> <p>Wybór struktury programu komputerowego na bazie opracowanego ogólnego komputerowego programu do obsługi systemu pomiarowego i procesu pomiarowego.</p> <p>Określenie temperatury otoczenia, parametrów wymuszeń i odpowiedzi przetworników badanych i wzorcowych oraz trybu pracy przetworników.</p>

PROCES POMIAROWY

Wybór listwy zębatej i koła zębatego oraz ich zamocowanie na części mechanicznej stanowiska.

Nastawienie prędkości obrotowej silnika napędowego.

Nastawienie amplitudy prądu i_c o f_c

Nastawienie częstotliwości f_c

Nastawienie liczby pomiarów w serii powtórzeń.

Rejestracja sygnałów elektrycznych.

Analiza wstępna zarejestrowanych sygnałów elektrycznych w czasie jednego pomiaru.

Analiza powtarzalności pomiarów na podstawie porównania zarejestrowanych sygnałów w serii pomiarowej.

Porównanie charakterystyk widmowych badanych przebiegów.

Rejestracja jednoczesna.

Analiza harmoniczna i widmowa. Porównanie przebiegów badanych z wzorcowymi.

Analiza powtarzalności pierwszego rodzaju.

Analiza powtarzalności drugiego rodzaju.

PRZETWORZENIE WYNIKÓW POMIARÓW NA CHARAKTERYSTYKI METROLOGICZNE

PREZENTACJA WYNIKÓW POMIARÓW W POSTACI WYKRESÓW I TABLIC

Na ploterze i drukarce mozaikowej w formie dokumentacji pomiarowej.

Powtarzalność określaną na podstawie pomiarów drugiego rodzaju można oszacować za pomocą współczynnika k_2 :

$$k_2 = \frac{\Delta \tau}{\tau} \quad /2/$$

gdzie:

$\Delta \tau$ – odległość między środkami przedziałów τ' określanych na podstawie pomiarów dla obu kierunków ruchu kontrolowanego elementu.

Powtarzalność pierwszego i drugiego rodzaju powinna być definiowana charakterystykami statystycznymi i dynamicznymi w funkcji częstotliwości generowania impulsów i natężenia pola przemagnesowującego.

W tabelicy 1 zestawiono uogólnione charakterystyki objęte badaniami mającymi na celu określenie właściwości metrologicznych przetworników.

3. Program badań

Program badań przetworników, wykonywany z użyciem stanowiska, obejmuje:

- bezpośrednie pomiary wielkości podstawowych charakteryzujących właściwości badanych sygnałów i przetworników oraz rejestrację wyników pomiarów,
- komputerową obróbkę wyników pomiarów w celu znalezienia wartości wielkości pochodnych i wyprowadzenie wyników pomiarów w postaci wykresów dwu- i trójwymiarowych,
- komputerową analizę wyników pomiarów, w tym analizę fourierowską i stochastyczną sygnałów elektrycznych i wyprowadzenie wyników analizy w postaci tablic i wykresów dwu- i trójwymiarowych.

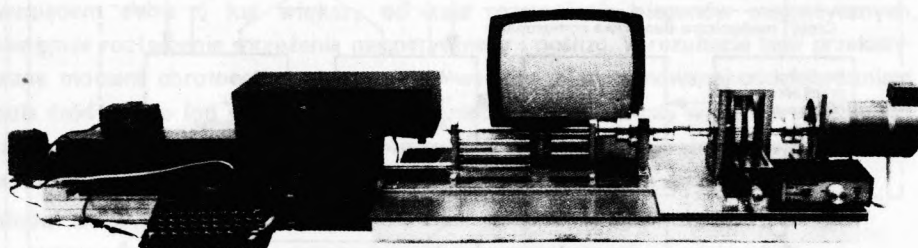
Program badań jest każdorazowo dostosowywany do charakteru przedmiotu badań. Jego zakres zależy między innymi od:

- rodzaju wykorzystywanego materiału (silnie magnetostrykcyjnego lub zeromagnetostrykcyjnego),
- charakteru wytwarzanych sygnałów elektrycznych,
- rodzaju mierzonej wielkości,
- zasady działania przetwornika pomiarowego,

Przykładowe algorytmy programu badawczego dotyczące przetworników przemieszczeń liniowych i kątowych podano w tabelicy 2 wraz ze stosownym komentarzem.

4. Charakterystyka stanowiska badawczego

Program badań przetworników z amorficznymi materiałami magnetycznymi wymaga zastosowania odpowiedniego uniwersalnego stanowiska badawczego, które nie jest dostępne na rynku. Stanowisko badawcze (fot.) zbudowane w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów umożliwia pomiary odpowiednich wielkości mechanicznych z dużą dokładnością, zdeterminowaną między innymi precyzją wykonania poszczególnych jego zespołów i elementów. Stanowisko to pozwala badać zarówno modele jak i prototypy przetworników pomiarowych w warunkach quasistatycznych i dynamicznych. Dzięki temu można uzyskać wszechstronną charakterystykę amorficzną tych przetworników.



Celem zastosowania stanowiska jest:

- dobór rozmieszczenia elementów obwodu magnetycznego przetworników pomiarowych oraz sposobu przemagnesowywania elementów o silnej magnetostrykcji i magnesowania elementów zeromagnetostrykcyjnych z uwzględnieniem kryteriów:
 - maksymalnej odporności przetworników na zakłócenia,
 - maksymalnego poziomu energetycznego generowanych sygnałów elektrycznych,
 - jak największej pewności działania,
- poznanie właściwości metrologicznych badanych modeli przetworników.

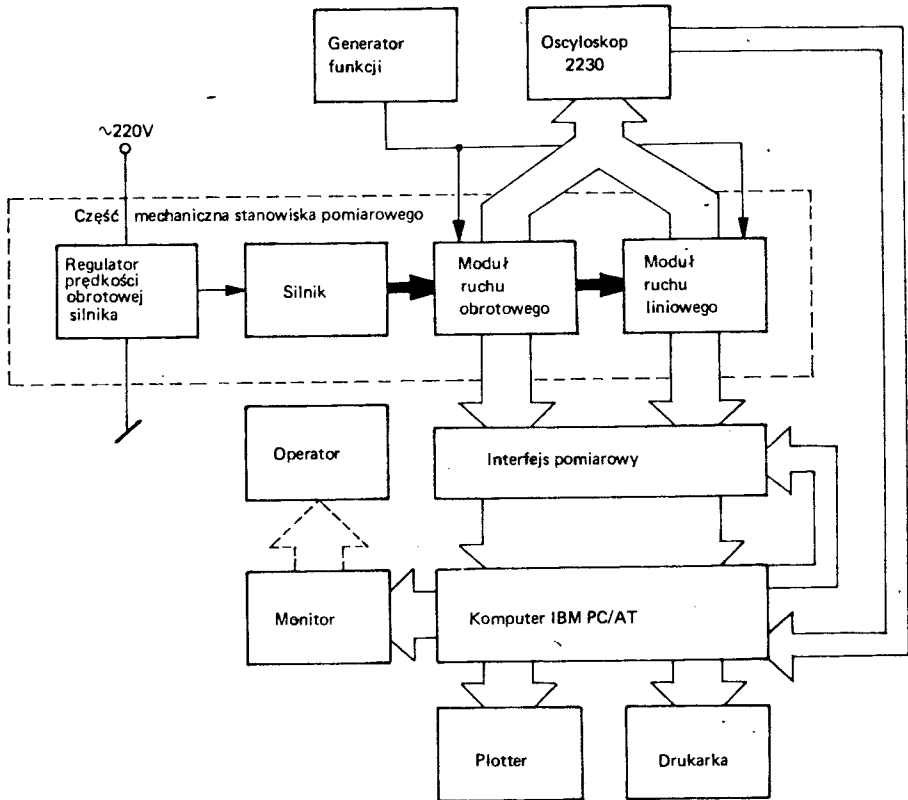
Stanowisko to spełnia następujące funkcje:

- umożliwia badanie przetworników, których obwody magnetyczne są zmieniane dzięki wzajemnym przemieszczeniom ich elementów składowych,
- pozwala porównywać właściwości metrologiczne modeli przetworników z właściwościami ich wzorców,
- daje możliwość przebadania przetworników różnych wielkości mechanicznych, między innymi: położenia, przemieszczeń, prędkości w ruchu liniowym i obrotowym oraz siły i wydłużeń liniowych.

Stanowisko badawcze ma charakter uniwersalny. Jest stanowiskiem o strukturze modu-

larnej, którą można zmieniać w zależności od programu badań. W skład struktury mechanicznej wchodzi (rys. 1):

- moduł napędowy,
- moduł do badania przetworników wielkości charakteryzujących ruch obrotowy,
- moduł do badania przetworników wielkości charakteryzujących ruch liniowy.



Rys. 1.

Całość struktury jest umieszczona na wspólnej płycie podstawy i na listwach usztywniających wykorzystanych dodatkowo do mocowania uzupełniających elementów stanowiska.

Moduł napędowy, służący do napędzania modułów pomiarowych, zawiera:

- silnik komutatorowy prądu zmiennego o mocy 450 W i prędkości znamionowej 8000 obr/min,
- układ elektronicznej regulacji i stabilizacji prędkości obrotowej w zakresie 50...8000 obr/min z potencjometrem wieloobrotowym i dzielnikiem oporowym

napięcia do nastawiania podzakresów zmian prędkości obrotowej, dokładność stabilizacji prędkości obrotowej 0,5%,

- przetwornik prędkości obrotowej, to jest multitachometr DMT z przetwornikiem optoelektronicznym lub magnetoelektrycznym OPP-1 lub OPP-2 współpracującym z kołem zębatym w module ruchu obrotowego.

Moduł do badania przetworników wielkości charakteryzujących ruch obrotowy (moduł ruchu obrotowego) jest napędzany za pomocą sprzęgła magnetycznego czołowego lub sprzęgła tarczowego z wkładką gumową do elastycznego przenoszenia momentu obrotowego i tłumienia drgań mechanicznych. Właściwości tłumiące ma również sprzęgło magnetyczne, które stanowi ponadto element zabezpieczający przed przeciążeniami mechanicznymi. W przypadku przeciążenia, gdy tarcze sprzęgła przekręcą się względem siebie o kąt większy od kąta rozstawienia biegunów magnetycznych, następuje rozłączenie sprzężenia magnetycznego i poślizg. W rezultacie tego przekazywany moment obrotowy zmniejsza się do wartości zdeterminowanej oddziaływaniem pola źródłowego (od magnesów) i pola wznicanego przez prądy wirowe w obudowach tarcz i w magnesach ferrytowych. Ponowne przywrócenie sprzężenia magnetycznego jest możliwe po zrównaniu się prędkości obrotowych obu tarcz sprzęgła.

Moduł ten wyposażono w:

- zestaw wymiennych kół zębatych o zębach prostokątnych,
- stoliki do montowania modeli przetworników pomiarowych przesuwane za pomocą śrub mikrometrycznych,
- przyłączalny impulsowy przetwornik optoelektroniczny firmy INTROL, 14-bitowy, który spełnia rolę przetwornika wzorcowego wytwarzającego dyskretny sygnał elektryczny odniesienia.

Moduł do badania przetworników wielkości charakteryzujących ruch liniowy (moduł ruchu liniowego), umieszczony za modułem ruchu obrotowego, jest napędzany za pomocą przekładni falowej o przełożeniu 150:1 i śruby pociągowej ze szlifowanym gwintem prostokątnym o skoku 2 mm i długości 160 mm. Śruba ta powoduje ruch przesuwny stolika do mocowania wsporników z badanymi modelami względem listew zębatych o zębach prostokątnych. Listwy zębate, wymienne, umieszczone u podstawy układu nośnego stolika mają długość 250 mm. Przekładnia falowa o dużej dokładności umożliwia badanie przetworników przy prędkości przesuwu stolika w zakresie 0,01...0,7 mm/s, (dopuszczalna prędkość obrotowa wałka wejściowego przekładni falowej wynosi 3000 obr/min).

W celu zwiększenia prędkości przesuwu można wymienić przekładnię falową na wałek bezpośrednio przenoszący obroty silnika na śrubę pociągową. Prędkość przesuwu zmienia się wtedy w zakresie 1,5...280,0 mm/s. Podczas badania przetworników wielkości charakteryzujących ruch liniowy moduł ruchu obrotowego nie jest wyłączany, ponieważ koła zębate pełnią dodatkowo funkcję kół zamachowych, zwiększając stabilizację prędkości obrotowej silnika.

Moduł ten wyposażono dodatkowo w:

- zestaw wymiennych listew zębatych,
- przyłączalny induktosyn liniowy z przetwornikiem sygnału elektrycznego na bazie mikroprocesora Z-80, induktosyn ten pełni rolę przetwornika wzorcowego o rozdzielczości $0,2 \mu\text{m}$,
- przyłączalny przetwornik optoelektroniczny firmy INTROL, wykorzystywany zastępczo na wypadek uszkodzenia induktosyna, głównie jednak pracujący w module ruchu obrotowego.

Moduł ten jest odłączany od napędu w przypadku badań przetworników w module ruchu obrotowego przy prędkości obrotowej powyżej 3000 obr/min, o ile nie stosuje się sprzężenia bezpośredniego.

Poszczególne moduły pomiarowe są umieszczone na oddzielnych płytach położonych na wspólnej płycie podłoża. Rozmieszczenie modułów umożliwia dodatkowe zmiany w konfiguracji mechanicznej, dzięki czemu można:

- przemieszczać przetwornik optoelektroniczny,
- wymieniać sprzęgła pośredniczące w przekazywaniu napędu od silnika elektrycznego,
- zmieniać rozmieszczenie elementów obwodów magnetycznych badanych przetworników,
- dostosowywać moduły do badań modeli przetworników innych wielkości mechanicznych, między innymi:
 - siły, z uwagi na zastosowaną przekładnię falową i śrubową, które zwielokrotniają moment obrotowy silnika,
 - ciśnienia i naprężeń mechanicznych,
 - wydłużenia, z powodu spowolnienia prędkości przesuwu.

Dostosowanie modułu ruchu liniowego do pomiarów siły polega na symetrycznym obciążeniu podstawy stolika napędzanego śrubą pociągową elementami rozciągany przetworników siły w celu uniknięcia deformacji w układzie napędowym. W płycie modułu przewidziano otwory do mocowania bolców zaczepowych. Zakres pomiaru siły osiągnany na stanowisku wynosi $0 \dots 100 \text{ N}$. Wraz z pomiarem siły można wykonywać pomiar wydłużenia elementu rozciąganego i badać przebieg charakterystyki sprężystości dzięki zastosowanemu induktosynowemu przetwornikowi przemieszczeń liniowych.

Opisane stanowisko mechaniczne współpracuje z:

- generatorem funkcji MG 5010 firmy TEKTRONIX,
- oscyloskopem z pamięcią 2230 firmy TEKTRONIX,
- komputerem IBM PC-AT wyposażonym dodatkowo w przetworniki AD/DA.

Generator funkcji i oscyloskop są wyposażone w interfejsy GPIB umożliwiające sprzężenie z komputerem w system pomiarowy o żądanej konfiguracji. Generator

funkcji wykorzystuje się do wytwarzania określonych sygnałów elektrycznych, w tym wymuszeń i sygnałów wzorcowych. Oscyloskop służy do zbierania danych pomiarowych, głównie w postaci przebiegów sygnałów elektrycznych oraz do kontroli procesu pomiarowego.

Komputer stanowi podstawową część systemu pomiarowego, która steruje procesem pomiarowym, zbiera i przetwarza dane pomiarowe, opracowuje wyniki pomiarów w postaci tablic i wykresów.

Literatura

- [1] Encyklopedia fizyki. Warszawa PWN 1972.
- [2] Jaworski J., Nałęcz M.: Miernictwo magnetyczne. Warszawa WNT 1968.
- [3] Recent magnetics for electronics. North—Holland 1986.
- [4] Magnetyki amorficzne. Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Warszawa 1983.
- [5] Karkoszka P.: Bistabilne materiały magnetyczne w technice pomiarowej. Biuletyn PIAP 3/1987.
- [6] Publikacje IEEE Transactions on Magnetism z lat 1976÷1988.
- [7] Publikacje SAE Technical paper series z lat 1976÷1984.