



## System pomiarowy do wszechstronnych badań maszyn elektrycznych

ADAM BIERNAT<sup>1</sup>, WŁODZIMIERZ PRZYBOROWSKI

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej,  
ul. Koszykowa 76, 01-444 Warszawa, adam.biernat@ee.pw.edu.pl

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych,  
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 01-908 Warszawa, wlodzimierz.przyborowski@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono system pomiarowy przeznaczony do wszechstronnych eksperymentalnych badań różnego typu maszyn elektrycznych. Badania te obejmują pomiary wielkości elektrycznych, elektromagnetycznych, kinematycznych, jak również mechanicznych oraz cieplnych. Do podstawowych pomiarów maszyn elektrycznych zalicza się pomiary prądów i napięcia w obwodach elektrycznych, obejmujące napięcia na elementach rezystancyjnych i ogólnie impedancyjnych tych obwodów oraz napięcia indukowane. W zależności od klasy i typu maszyny mierzone wielkości są stałe lub zmienne w czasie. Niektóre wielkości przemian elektromagnetycznych mierzy się w obszarze konstrukcji maszyny. Ponadto do oceny stanu pracy maszyny i jej stanu technicznego ważne są również parametry mierzonych wielkości, tzw. dyskryminanty sygnałów (wartości średnie, skuteczne, maksymalne) oraz ich przebiegi. Ze względu na dużą rozpiętość parametrów stanu maszyny, czyli jej zmiennych stanu - w różnych stanach obciążeń, wielość tych sygnałów i potrzebę znajomości ich różnych cech, konieczne staje się zastosowanie w układach pomiarowych podukładów przetwarzania sygnałów, czyli systemu akwizycji sygnałów. Jest to obecnie możliwe dzięki opracowaniu - zaprogramowaniu części torów pomiarowych w systemie CAM (*Computer Aided Measurement*) z zastosowaniem graficznego języka programowania zintegrowanego systemu typu LabVIEW. W artykule przedstawiono również przykładowe podukłady systemu akwizycji pomiarów sygnałów pozaelektromagnetycznych, wibracyjnych i akustycznych, generowanych w maszynach.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, badania maszyn, system pomiarowy

DOI: 10.5604/01.3001.0014.2791

## 1. Wstęp

Badania maszyn elektrycznych należą do jednych z najtrudniejszych problemów w całej technosferze, ponieważ w tych maszynach, będących przetwornikami elektromechanicznymi, zachodzą procesy: elektryczne, magnetyczne, elektromagnetyczne, termodynamiczne (cieplne), kinetyczne, chemiczne [1, 2, 3, 8, 9]. Należy również zauważyć, że przy zachodzących w nich użytecznych przemianach energii występują również procesy różnego rodzaju strat mocy oraz fizyczne efekty pasożytnicze. Wszystkie przemiany energii są ze sobą sprzężone. Wyjątkowymi cechami maszyn elektrycznych jest rozpiętość ich znamionowych wartości mocy, napięć i prądów nieporównywalna z innymi urządzeniami, w których zachodzą przemiany energii. Przykładem są następujące przedziały wartości: mocy znamionowej  $P_N <10^{-1} - 10^9>$  W, napięcia  $U_N <10^{-2} - k 10^4>$  V, prądu  $I_N <10^{-2} - p 10^4>$  A. Mnożniki  $k$  i  $p$  wskazują na możliwość zwielokrotnienia górnych zakresów wskazanych wartości. Bardzo szeroki jest również przedział prędkości obrotowych, szacowany od wartości kilku obrotów na minutę do kilkuset tysięcy obrotów. Maszyny elektryczne pracują w różnych reżimach, jako: silniki, prądnice, hamownice, sprzęgła, kompensatory, a jako silniki realizują różną kinematykę — obrotową, postępową (maszyny liniowe), a nawet o trzech stopniach swobody. Warto zaznaczyć jest również przekraczanie wartości znamionowych prądów i napięć w pomiarach kontrolnych tych maszyn. Ponadto badania eksperymentalne maszyn elektrycznych wykonywane są zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych, przeprowadzane są w stanach pracy ustalonej, a także w stanach dynamicznych (silnie nieustalonych — w odniesieniu do wielkości elektromagnetycznych i kinematycznych).

Biorąc pod uwagę budowę maszyn elektrycznych i ogólne zasady ich działania oraz procesy w nich zachodzące, wyróżnia się następujące badania eksperymentalne w odniesieniu do wielkości fizycznych:

- elektryczne,
- magnetyczne,
- mechaniczne,
- termiczne,
- chemiczne.

Ze względu na podstawowe układy konstrukcyjne maszyn wyróżnia się pomiary w strefach:

- stojanów, wzbudników,
- wirników, biegników.

Badania eksperymentalne maszyn elektrycznych można również odnieść do ich podstawowych obwodów, którymi są:

1. obwody elektryczne, czyli uzwojenia (magneśnicy i twornika; wzbudnika i twornika, pierwotnego i wtórnego);

2. ogólnie traktowany obwód magnetyczny obejmujący rdzenie jarzm i zębów albo biegunów stojanów, szczelinę powietrzną przywornikową, bieguny albo zęby i jarzma wirników — w przypadku transformatorów obwód magnetyczny obejmuje kolumny i jarzma.

Podstawowymi wielkościami (sygnałami) pomiarowymi w badaniach maszyn są napięcia i prądy oraz ich częstotliwości i jednocześnie moce (czynna, bierna – stosownie do typu maszyn), a także prędkość obrotowa i moment, którym maszyna jest obciążona.

Ważnym sygnałem pomiarowym jest również indukcja magnetyczna cechująca stan namagnesowania elementów obwodu magnetycznego, jednak pomiar tej wielkości jest niezwykle trudny i nie jest możliwy we wszystkich miejscach maszyny.

Do oceny stanu pracy maszyny i jej stanu technicznego (pod względem diagnostycznym) ważne są również wartości i charakter zmienności sygnałów wielkości pozaelektromagnetycznych, do których zalicza się:

1. temperaturę w różnych miejscach obwodów elektrycznych i magnetycznych oraz temperaturę mediów chłodzących;
2. parametry sygnałów wibracyjnych (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń i spektrum częstotliwości);
3. poziomu hałasu.

Tak szeroki zakres badań eksperymentalnych maszyn elektrycznych jest obecnie możliwy dzięki zastosowaniu różnego rodzaju czujników (sensorów) pomiarowych cechujących się wysokim stopniem miniaturyzacji i zintegrowania z przetwornikami (przedwzmacniaczami i wzmacniaczami) pomiarowymi oraz sprzężenia ich z przetwornikami sygnałów (A/A, A/C, C/A, C/C; A – analogowych, C – cyfrowych), a przede wszystkim zaprogramowaniu części torów pomiarowych w systemie CAM (*Computer Aided Measurement*) z zastosowaniem graficznego języka programowania zintegrowanego systemu typu LabVIEW.

Zaprojektowany odpowiednio do typu maszyny system pomiarowy, ze wskazanymi elementami i podzespołami oraz oprogramowaniem, powinien być wprowadzony do oprzyrządowania metrologicznego maszyn elektrycznych zarówno w przypadku badań podstawowych, jak i specjalnych badań laboratoryjnych i diagnostycznych.

W artykule przedstawiono przykładowe tory pomiarowe obejmujące sensory i przetworniki sygnałów analogowych. Pokazano i scharakteryzowano przykładowe diagramy, w których zachodzi przetwarzanie wskazanych sygnałów pomiarowych, ale w reprezentacji cyfrowej, a także zaprezentowano przykładowe panele ilustrujące wyznaczone charakterystyki i przebiegi zmiennych stanu charakteryzujące stany pracy maszyn.

Artykuł jest rozszerzeniem referatu zaprezentowanego przez autorów na symposium DIAG 2019 oraz syntetycznym opracowaniem wcześniejszych prac autorów.

## 2. Podstawowe procedury i funkcje zmiennych stanu w badaniach eksperymentalnych maszyn elektrycznych

Zbiór normatywnych badań eksperymentalnych maszyn elektrycznych jest wyjątkowo liczny, biorąc pod uwagę różne reżimy pracy: silnikowa — prądnicowa; różne typy maszyn: prądu stałego, asynchroniczne, synchroniczne, transformatory oraz bardzo obszerną grupę maszyn specjalnych obejmującą elektromaszynowe elementy automatyki.

Do podstawowych prób maszyn zalicza się:

A. stany:

- a) jałowy;  $P_{10}, I_{10}, n, \cos \varphi_0 = f(U); T = 0$  — silniki prądu przemiennego,  $U_i = f(I_f), I = 0$  — prądnice;
- b) zwarcia;  $P_{1z}, I_{1z}, \cos \phi_z = f(U), n = 0$  — silniki prądu przemiennego,  $I = f(I_f), U = 0$  — prądnica synchroniczna;
- c) obciążenia;  $P_1, I_1, n, \cos \varphi, \eta = f(T): U = \text{const}$ ; silniki;

B. charakterystyki eksploatacyjne prądnicy synchronicznej:

a) zewnętrzne:

$$U = f(I)$$

$$\langle I_f, \cos \phi, n \rangle = \text{const},$$

b) regulacyjne:

$$I_f = f(I)$$

$$\langle U, \cos \phi, n \rangle = \text{const},$$

c) obciążenia:

$$U = f(I_f)$$

$$\langle I, \cos \phi, n \rangle = \text{const},$$

Obszerny zbiór charakterystyk dotyczy prób regulacyjnych silników prądu stałego, przemiennego i silników przełączalnych. Charakterystyki te można formalnie określić ogólnym zapisem  $n = f(U, f, I, T)$ , oznaczającym zależność prędkości obrotowej  $n$  od: napięcia  $U$ , częstotliwości  $f$ , prądu  $I$ , momentu  $T$ , które są przyjmowane jako zmienne niezależne lub ustalane jako parametry.

Trzeba również podkreślić, że oprócz badania stanów ustalonych maszyn elektrycznych istotne są wyniki badań maszyn w stanach dynamicznych zarówno przy skokowych zmianach napięcia, jak i obciążenia momentem (silniki) bądź mocą (generatory), co skutkuje zmianami prędkości i prądu maszyny. Jednak ten zakres zagadnień pomiarowych wymaga odrębnego opracowania.

Z przedstawionych powyżej zestawień związków zmiennych fizykalnych określających badane maszyny elektryczne można stwierdzić, że podstawowymi wielkościami są:

1.  $U$  — napięcia i  $I$  — prądy (stałe i zmienne),
2.  $f$  — częstotliwość,
3.  $F$  — siła lub  $T$  — moment obrotowy,
4.  $n$  — prędkość obrotowa

oraz wielkości pochodne wyznaczane na podstawie wielkości podstawowych:

5.  $P$  — moc czynna,
6.  $\cos \varphi$  — współczynnik mocy,
7.  $\eta$  — sprawność.

Do ważnych wielkości fizycznych mierzonych w maszynach elektrycznych zalicza się:

- indukcję magnetyczną —  $B$ ,
- temperaturę —  $v, (t)$ ,
- wielkości wibroakustyczne: przyspieszenia —  $a$ , prędkości —  $v$ , przemieszczenia —  $d$ , ciśnienia akustyczne —  $p$ .

### 3. Czujniki i przetworniki pomiarowe podstawowych zmiennych stanu eksploatacyjnego maszyn elektrycznych

#### 3.1. Czujniki pomiarowe

W celu pomiaru wskazanych wielkości fizycznych w obwodach maszyn elektrycznych konieczne jest wyposażenie maszyn w odpowiednią liczbę czujników pomiarowych — sensorów. Są to przetworniki pierwotne włączone do obwodów elektrycznych maszyn lub czujniki, które bezpośrednio stykają się z elementami badanej maszyny i na które bezpośrednio oddziałują sygnały pól fizycznych powstających w maszynie. Czujniki pomiarowe są instalowane wewnątrz i na zewnątrz maszyn. Szczególnie złożone są przedsięwzięcia instalacji czujników wewnętrznych, ponieważ muszą być specjalnie zabezpieczone ze względu na sprawność ich działania oraz w sposób niezagrażający działaniu badanej maszyny w procesach jej eksploatacji. Współcześnie stosowaną zasadą instalacji czujników — przetworników pomiarowych — jest odseparowanie galwaniczne ich obwodów od obwodów maszyn i odizolowanie ich od ustrojów konstrukcyjnych maszyny.

W maszynach wysokonapięciowych i o mocach granicznych do czujników czołowych pomiarów napięć i prądów zalicza się przekładniki napięciowe i prądowe i kolejne przetworniki połączone kaskadowo, aby uzyskać odpowiednie kondycjonowanie sygnałów, czyli przystosowanie ich poziomu do przetwornika analogowo-cyfrowego. Należy podkreślić, że w stosowanych obecnie czujnikach i przetwornikach pomiarowych wielkością wyjściową jest zawsze wielkość elektryczna (prąd, napięcie, a także napięciowy lub prądowy sygnał częstotliwościowy).

Dla procesu pomiarowego i transmisji sygnałów ważne są parametry znamionowe i eksploatacyjne czujników i przetworników pomiarowych.

Podstawowymi parametrami czujników i przetworników pomiarowych są:

1. zakres pomiarowy wielkości mierzonej,
2. klasa dokładności,

3. czułość przetwornika,
4. rodzaj i wartość sygnału wyjściowego.

Dodatkowo definiuje się:

5. próg pobudliwości,
6. strefę martwą,
7. błąd przesunięcia charakterystyki,
8. błąd nachylenia charakterystyki,
9. błąd liniowości,
10. błąd histerezy,
11. błąd kwantowania,
12. wrażliwość na zakłócenia,
13. właściwości dynamiczne.

### 3.2. Przetworniki pomiarowe i wzmacniacze sygnałów

W wielu pomiarach sygnałów stosowane są przetworniki pomiarowe obejmujące czujniki i przetworniki sygnału. Przetwornik pomiarowy, zwany również przedwzmacniaczem, służy do przetworzenia elektrycznego sygnału ładunku i prądu na sygnał napięcia. Można ogólnie stwierdzić, że przetwornik sygnału przetwarza mierzoną wielkość fizykalną jednego rodzaju na inną wielkość będącą sygnałem przetworzonym  $\langle S_m | S_p \rangle$ . Przykładem są akcelerometry, w których sygnał przyspieszenia jest określony ładunkiem elektrycznym przekształcanym w przed-

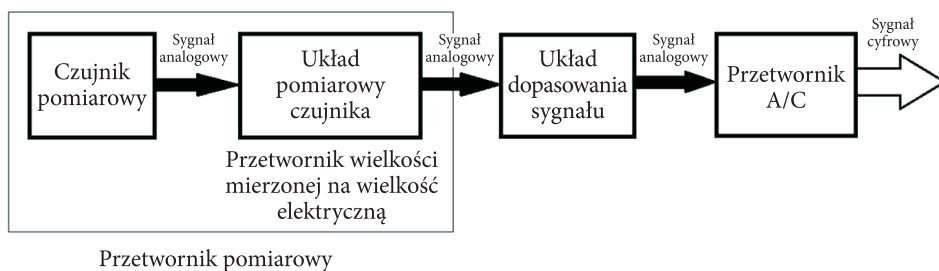
wzmacniaczu na sygnał napięciowy  $\langle \langle x | q \rangle | u \rangle$  ( $\ddot{x}$  – przyspieszenie,  $q$  – ładunek,

$u$  – napięcie). Obecnie wiele czujników pomiarowych stanowi jednolity element – przyrząd pomiarowy z przetwornikiem pomiarowym. Eliminuje się w ten sposób pośrednie kalibracje toru pomiarowego. Ważne jest również zastosowanie w tym odcinku toru pomiarowego wzmacniaczy sygnałów w celu standaryzacji poziomu wartości mierzonych sygnałów. Współczesne układy wzmacniaczy są wyposażone m.in. w filtry sygnałów, co pozwala na etapie pomiarów selekcjonować składowe harmoniczne sygnałów, które są ważne w procedurze ocen mierzonych sygnałów, w szczególności w procedurach diagnostycznych.

Na rysunku 1 przedstawiono czołowy odcinek toru pomiarowego.

Do podstawowych przetworników sygnałów elektrycznych w systemach pomiarowych maszyn elektrycznych zalicza się:

- Przetwornik sygnałów prądowych poszczególnych obwodów maszyny, z zasady przetwarzany w sygnał napięciowy  $\langle i | u \rangle$ . Równie ważny jest przetwornik sygnałów napięciowych  $\langle u_c | u \rangle$ .



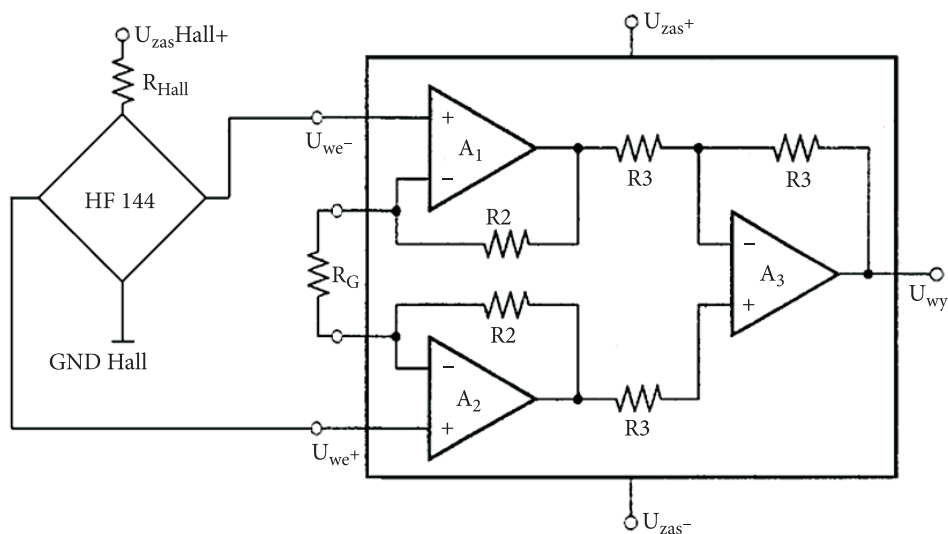
Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika pomiarowego, układu kondycjonowania sygnału i przetwornika A/C

- Szczególne znaczenie ma przetwornik natężenia lub indukcji pola magnetycznego także przetworzony w sygnał napięciowy  $\langle \langle \langle I | H \rangle | B \rangle | u \rangle$ . Sygnały wielkości pola elektromagnetycznego są ważne z uwagi na ocenę stanu namagnesowania podobszarów obwodu magnetycznego maszyny.
- Drugą grupą są przetworniki wielkości mechanicznych, kinematycznych i temperatury oraz sygnałów akustycznych.
- Szczególne znaczenie mają przetworniki drgań — akcelerometry — z uwagi na rozwiniętą diagnostykę wibroakustyczną.

Bardzo ważnymi wielkościami mierzonymi w maszynach elektrycznych są siły  $F$  lub momenty obrotowe  $T$  maszyn  $\langle F, T | u \rangle$ .

### 3.3. Układy kondycjonowania sygnałów

Zadaniem układów kondycjonowania sygnału jest dopasowanie zakresu sygnału czujnika pomiarowego do zakresu wejściowego przetwornika A/C oraz eliminacja szumów i dopasowanie zakresu częstotliwościowego sygnału czujnika pomiarowego do częstotliwości próbkowania przetwornika A/C. Od układów kondycjonowania sygnału wymaga się zwiększenia stosunku sygnału do szumu (SNR), aby sygnał przetworzony na wartość cyfrową zawierał taką ilość informacji, która odpowiada liczbie użytych dalej bitów kodujących. Dodatkowo układ kondycjonowania sygnału może spełniać zadanie separacji galwanicznej pomiędzy czujnikiem pomiarowym a systemem pomiarowym. Do układów kondycjonowania sygnałów należą: wzmacniacze pomiarowe, aktywne filtry analogowe, układy separujące.



Rys. 2. Przykład zastosowania wzmacniacza pomiarowego tłumiącego wejściowe sygnały sumacyjne sondy hallotronowej

### 3.4. Przetworniki analogowo-cyfrowe sygnałów — karta pomiarowa

Przetworzenie sygnałów ciągłych w odpowiadające im obrazy — sygnały o formie dyskretnej — za pośrednictwem przetworników A/C stało się etapem przełomowym w metrologii ze względu na uproszczenie dalszej archiwizacji i możliwość operatywnego przeprowadzania kolejnych operacji na tych sygnałach. Do podstawowych parametrów kart pomiarowych zalicza się:

- liczbę wejść analogowych,
- maksymalną częstotliwość próbkowania,
- rozdzielczość (liczba bitów kodujących),
- zakres sygnałów wejściowych.

W przypadku systemów wielokanałowych niezwykle istotne jest zapewnienie przez układ przetwarzania analogowo-cyfrowego jednoczesnego pomiaru wszystkich mierzonych wielkości.

### 3.5. Osprzęt pomiarowy

Ważnymi elementami osprzętu pomiarowego stosowanymi w maszynach elektrycznych są przewody, które w strefie wewnętrznej maszyny muszą być ekranowane i zabezpieczone przed oddziaływaniami mechanicznymi i cieplnymi.



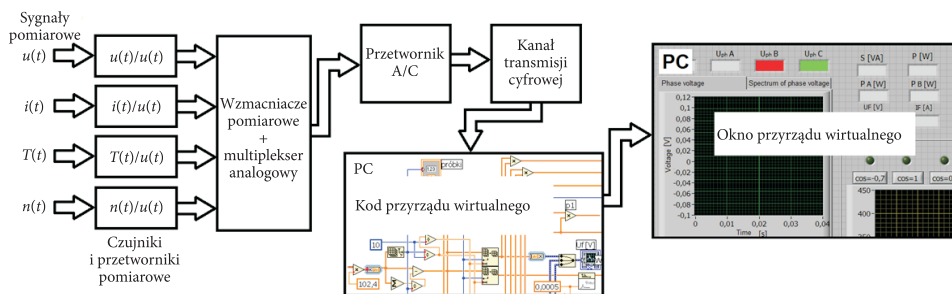
W przypadku maszyny o hermetycznym kadłubie muszą być zastosowane przepusty przelotowo-łącznikowe również odpowiednio zabezpieczone przed różnymi oddziaływaniami i zapewniające skuteczność połączeń.

### 3.6. Komputer

Najważniejszym podukładem systemu pomiarowego jest komputer z uwagi na część techniczną — hardwarową, wyposażony w zewnętrzne lub wewnętrzne przetworniki A/C — karty pomiarowe. Bardzo ważne jest również oprogramowanie narzędziowe (software) umożliwiające programową realizację przyrządu pomiarowego o żądanej funkcjonalności w celu analizy mierzonych sygnałów pomiarowych oraz podejmowania decyzji w przypadku pomiarów diagnostycznych.

Omówione przetworniki pomiarowe, układy przetwarzania sygnałów, osprzęt pomiarowy i oczywiście jednostka pomiarowo-obliczeniowa — komputer stanowią system pomiarowy.

Konwencjonalną strukturę systemu można przedstawić w formie schematu (rys. 3).



Rys. 3. Struktura systemu pomiarowego złożonego z czujników i przetworników pomiarowych, wzmacniaczy pomiarowych, przetwornika A/C oraz systemu przetworników, mierników, rejestratorów wirtualnych i panelu wirtualnego przyrządu

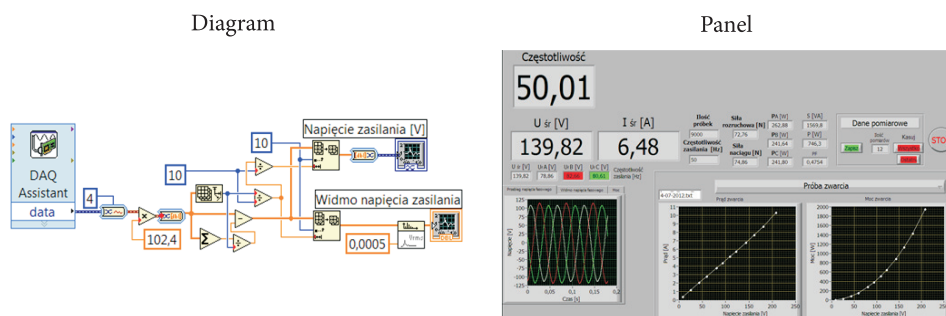
Zespół czujników i przetworników pomiarowych w ogólnym przypadku jest oczywiście zmnożony stosownie do liczby mierzonych sygnałów.

## 4. System przyrządów wirtualnych — diagramy i panele

W blokach transformacji sygnałów za przetwornikiem A/C jest strefa umownie w tym miejscu określona systemem narzędzi przetwarzania i archiwizowania sygnałów pomiarowych oraz systemem wizualizacji wyników pomiarów obejmujących regulatory, manipulatory i układy nastaw przyrządów wirtualnych.

W nomenklaturze graficznych języków programowania systemów bloki operacyjne sygnałów określa się mianem diagramów stanowiących tzw. kod programu, a bloki prezentacji wizualnej i układów manipulacyjnych określa się jako panele [5, 6]. Diagram prostego przyrządu wirtualnego umożliwiający wyznaczenie wartości skutecznej wielkości mierzonej oraz przykładowy panel wirtualnego przyrządu wyposażonego między innymi w okna prezentujące wartość mierzonej wielkości zostały przedstawione na rysunku 4.

Należy podkreślić, że szczególnym walorem podsystemu diagramów systemu CAM są bloki operacyjne sygnałów.

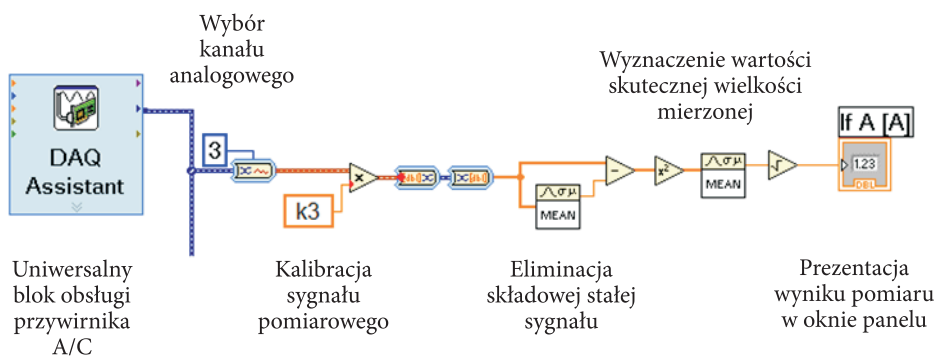


Rys. 4. Przykład diagramu i panelu przyrządu wirtualnego

#### 4.1. Diagramy

Jak stwierdzono wcześniej, jednym z najważniejszych układów w torze pomiarowym, poza przetwornikami pomiarowymi, są układy diagramów. W układzie torów diagramów zapewnia się warunki właściwego przetwarzania sygnałów związane z parametrami czujników i przetworników pomiarowych oraz cechami charakterystyk i ich niepewności pomiarowych wskazanych w wykazie parametrów <1-13>. W układach tych dokonuje się przeliczeń zdyskretyzowanych sygnałów mierzonych wielkości, skalowania sygnałów, wyznaczania współzależności, czyli obliczania charakterystyk oraz rodzin charakterystyk odpowiednio sparametryzowanych. Jest to istotny walor tej klasy systemów pomiarowych.

W kolejnym etapie obliczane są odpowiednie miary i wielkości pochodne tych sygnałów. Procedury te dotyczą przede wszystkim napięć i prądów maszyn. Ważną kwestią tych obliczeń jest regularyzacja sygnałów, biorąc pod uwagę, że w większości przypadków badane są maszyny trójfazowe ( $m = 3$ ). Ważna jest również odpowiedniość napięć i prądów fazowych w poszczególnych chwilach dyskretyzacji, ponieważ z form dyskretyzowanych sygnałów są obliczane moce (czynna, bierna i pozorna) oraz współczynnik mocy. Tak więc przesunięcia fazowe sygnałów są bardzo istotne.



Rys. 5. Schemat blokowy ogólnego diagramu akwizycji i prezentacji miary wybranej mierzonej wielkości zmiennej w czasie

Podstawowymi równaniami więzów dla tych wielkości są zależności

$$\sum_{k=1}^{m=3} i_{k,n} = 0 \quad \sum_{k=1}^{m=3} u_{k,n} = 0 \quad (1)$$

Następnie oblicza się wartości sumaryczne

$$u_{\Sigma n} = \sqrt{\sum_{k=1}^3 u_{k,n}^2} \quad i_{\Sigma n} = \sqrt{\sum_{k=1}^3 i_{k,n}^2} \quad (2)$$

i wartości skuteczne przebiegów tych wielkości

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_{\Sigma n}^2} \quad U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{\Sigma n}^2} \quad (3)$$

gdzie:  $N$  jest liczbą próbek dyskretyzacji w obserwowanym interwale czasowym przebiegów.

Moc czynną oblicza się ze wzoru

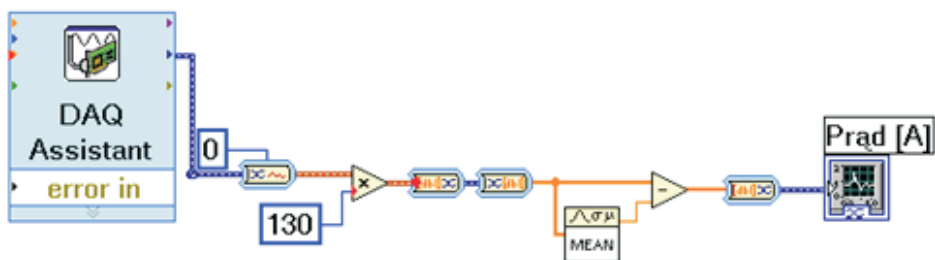
$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^3 u_{k,n} i_{k,n} \quad (4)$$

Moc pozorną oblicza się ze wzoru

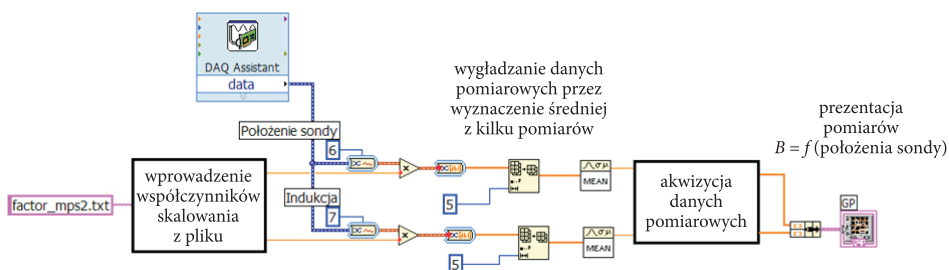
$$S^2 = U_{sk}^2 I_{sk}^2 \quad (5)$$

i na tej podstawie współczynnik mocy

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (6)$$



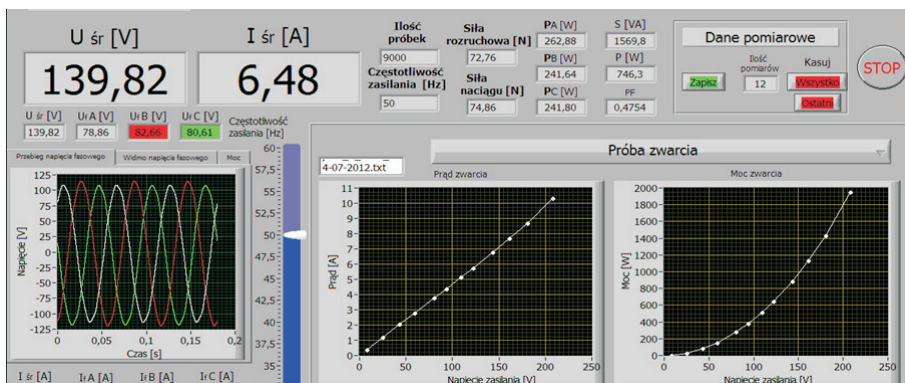
Rys. 6. Diagram mierzonego w funkcji czasu przebiegu prądu



Rys. 7. Diagram pomiaru rozkładu indukcji

Na podstawie pomierzonych i przetworzonych sygnałów formułowane są przebiegi mierzonych funkcji oraz odpowiednie charakterystyki w różnych współzależnościach zmiennych stanu eksploatacyjnego maszyn, jak również odpowiednio sparametryzowane. Można je przy tym bezpośrednio wizualizować w odpowiednio zaprojektowanych panelach. Zmierzone funkcje stanu eksploatacyjnego badanych maszyn są oczywiście archiwizowane w tabelach pomiarowych.

Przebiegi napięć fazowych silnika oraz charakterystyki prądu i mocy w stanie zwarcia silnika asynchronicznego przedstawiono w przykładowym panelu na rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowe przebiegi napięć fazowych silnika oraz charakterystyki prądu i mocy w stanie zwarcia

Na podstawie eksperymentalnie wyznaczonych charakterystyk można również obliczać charakterystyki pochodne zmiennych stanu eksploatacyjnego maszyn, a na ich podstawie parametry obwodowe maszyn.

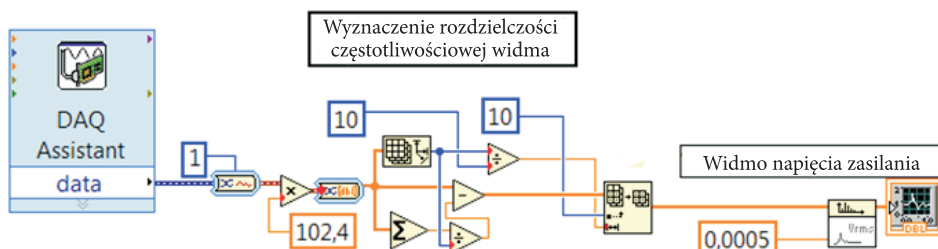
Znaczącym walorem tego systemu jest możliwość określania różnych miar wyznaczonych funkcji, porównywania tych funkcji oraz wyznaczenia wielkości pochodnych za pomocą odpowiednich operatorów. Są to np. operatory różniczkowania, całkowania i korelacji:

$$G_d(\xi) = \frac{d}{d\xi} F(\xi) \quad (7)$$

$$G_I(\xi) = \int F(\xi) d\xi \quad (8)$$

$$\Gamma_{f_2}^{f_1}(\xi^*) = \frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} f_1(\xi^* - \xi) f_2(\xi) d\xi \quad (9)$$

Bloki operacyjne sygnałów umieszczone w torach diagramów mają szczególnie istotne znaczenie w badaniach diagnostycznych maszyn, ponieważ w tych procedurach wykorzystuje się transformacje: Fouriera, Hilberta i falkowe. W ocenie mierzonych wielkości znaczenie ma również wyznaczenie odpowiednich charakterystyk czy portretów fazowych.



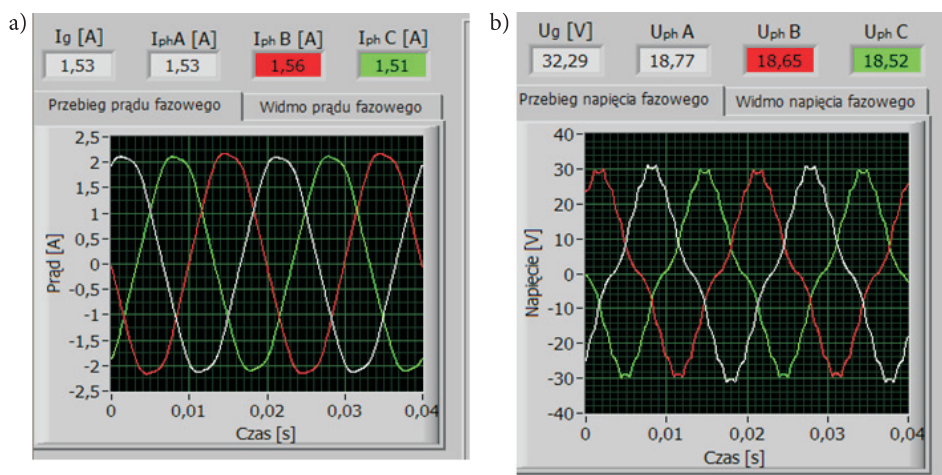
Rys. 9. Diagram mierzonej wielkości z blokiem operacyjnym transformacji Fouriera

Należy w tym miejscu nadmienić, że możliwe jest przesłanie zmierzonych i opracowywanych sygnałów z systemu LabVIEW do innych środowisk obliczeniowych, np. środowiska Matlab. Umożliwia to rozszerzenie analizy sygnałów i zwiększenie bazy ich miar.

Przykładowe wyniki pomiarów przebiegów napięć i prądów oraz odpowiednie charakterystyki innych zmiennych stanu eksploatacyjnego badanej maszyny, a także charakterystyki wielkości pochodnych zostaną w następnym punkcie zilustrowane zestawami stosownych paneli.

## 4.2. Panele

Zarejestrowane sygnały wielkości fizycznych są po transformacji w sygnały dyskretne i przeprowadzeniu obliczeń odwzorowywane ponownie w obrazy sygnałów, które są wizualizowane w postaci przebiegów czasowych lub charakterystyk. Funkcje te są przedstawiane w dedykowanych oknach paneli (co zostało już częściowo zaprezentowane przy omawianiu diagramów). Pozwala to na bezpośrednią ocenę przebiegów czasowych na przykład pod względem ich symetrii lub stopnia odkształcenia w zależności od stanu namagnesowania obwodu magnetycznego maszyny. Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi prądów w fazach transformatora i napięć prądnicy synchronicznej.

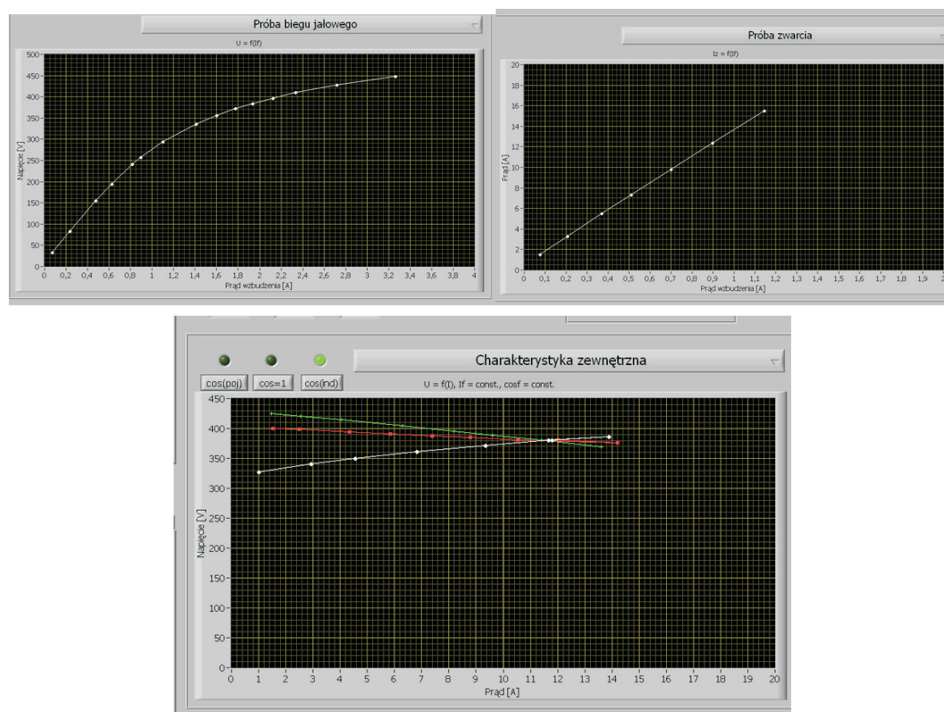


Rys. 10. Panele przebiegów: a) prądów fazowych transformatora, b) napięć fazowych prądnicy synchronicznej

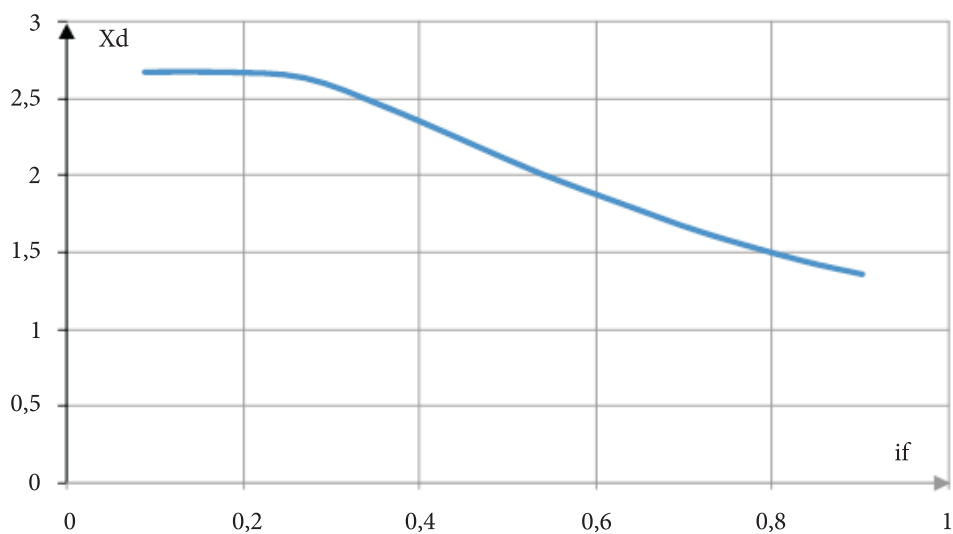
Na rysunku 11 przedstawiono charakterystyki stanu jałowego i zwarcia oraz charakterystyk zewnętrznych (sparametryzowanych współczynnikiem mocy) prądnicy synchronicznej.

Na podstawie wyznaczonych i opracowanych pomiarów można określić charakterystyki wielkości pochodnych. Przykładem jest funkcja reaktancji maszyny synchronicznej obliczona na podstawie charakterystyk stanu jałowego i zwarcia prądnicy, sporządzona grafiką ploterową (rys. 12).

Na rysunku 13 przedstawiono panel przebiegu (oscylogramu) mierzonego prądu silnika trójfazowego i jego widmo częstotliwościowe.

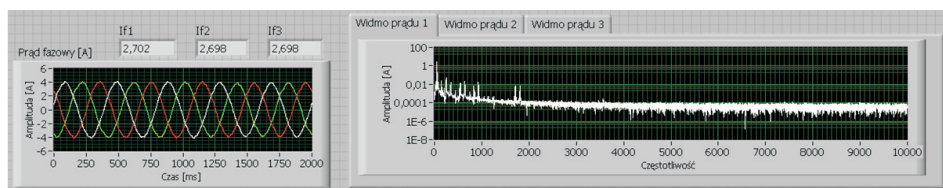


Rys. 11. Panele charakterystyk: stanu jałowego, zwarcia i zewnętrznych (sparametryzowanych współczynnikiem mocy) prądnicy synchronicznej



Rys. 12. Charakterystyka reaktancji prądnicy synchronicznej obliczona na podstawie pomiarów stanu jałowego i zwarcia

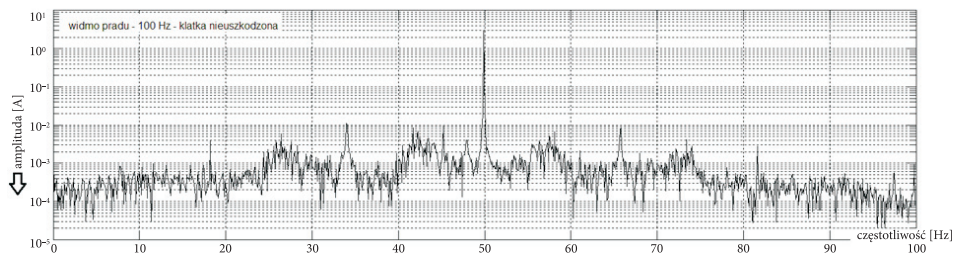




Rys. 13. Panel z monitorem przebiegu i widmem częstotliwościowym prądu

Jak zaznaczono wcześniej, wyniki pomiarów z układu wyjściowego diagramu mogą być przesyłane do innych środowisk obliczeniowych w celu ich dalszej analizy i ostatecznej wizualizacji z większą precyzją obliczeń i wyższą rozdzielczością obrazu. Przykładowy wynik widma prądu fazowego w silniku asynchronicznym klatkowym w zakresie niskich częstotliwości, opracowany po przesłaniu danych pomiarowych do środowiska obliczeniowego Matlab, przedstawiono na rysunku 14. Obserwowane obrazy stanowią podstawę analizy diagnostycznej klatki tego silnika.

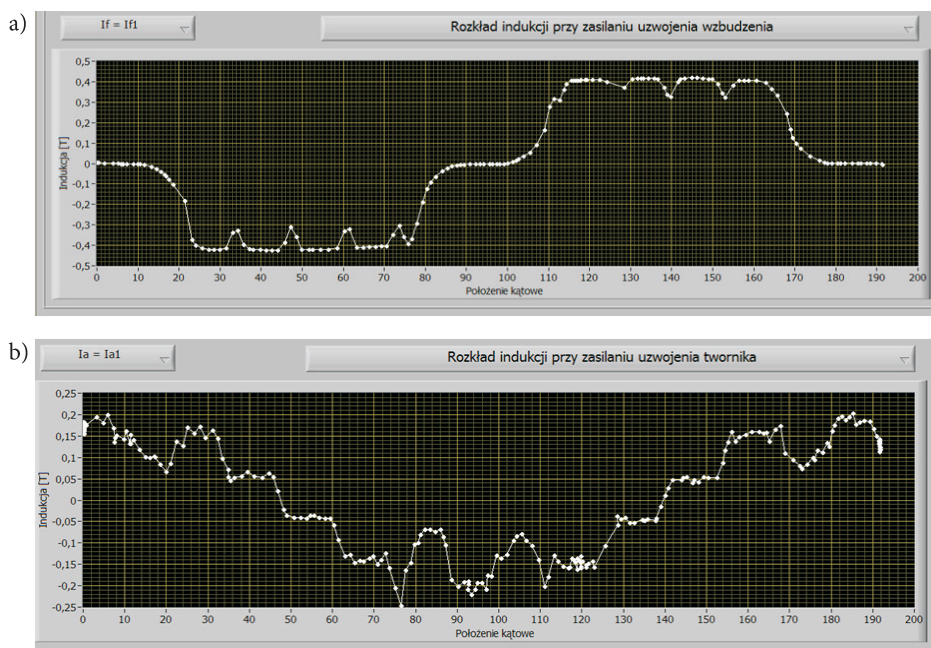
Należy podkreślić, że opracowywanie w trybie on-line wyników pomiarów i obliczanie wielkości pochodnych pomiarów oraz parametrów pochodnych z bezpośrednich wyników pomiarów jest bardzo dogodnie, w szczególności w sytuacjach orzeczeń eksperckich werdyktów diagnostycznych badanych maszyn.



Rys. 14. Widmo częstotliwościowe prądu fazowego silnika indukcyjnego klatkowego

Bardzo interesujące są pomiary wielkości połowych (elektromagnetycznych) maszyn elektrycznych, np. indukcji magnetycznej. Wielkość ta ma znaczenie w ocenie zaprojektowanej konstrukcji maszyny oraz w analizach jej stanu technicznego w procesach eksploatacyjnych. Jednak nie w każdej maszynie możliwe jest wprowadzenie sondy (halotronowej), a szczególnie trudne jest wyznaczenie **rozkładu przestrzennego** indukcji magnetycznej w maszynie. Ponadto badanie rozkładu pola magnetycznego jest procedurą wielowymiarową i uzyskuje się bardzo liczne zbiory wyników. Na przykład średnia liczba punktów pomiarowych indukcji magnetycznej w maszynie na długości podziałki biegunowej wynosi około kilkuset. System CAD umożliwia operatywne opracowanie tych wyników i ich wizualizację. Na rysunku 15 przedstawiono rozkłady indukcji magnetycznej w maszynie z różnych źródeł wzbudzających to pole.





Rys. 15. Panel z monitorem rozkładu indukcji w szczelinie powietrznej maszyny: a) rozkład od przepływu uzwojenia wzbudzającego biegunów głównych, b) rozkład od przepływu twornika

## 5. Diagramy i panele przyrządów wirtualnych wielkości pozaelektromagnetycznych

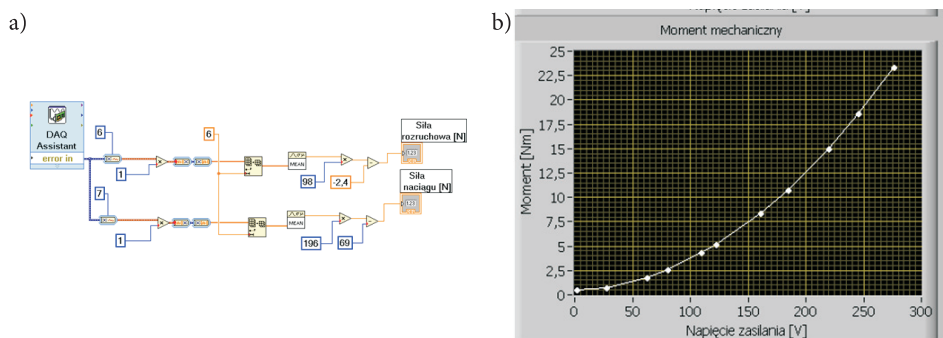
Odrębne pod względem technicznym i operacyjnym są zagadnienia pomiarów i opracowywania wyników wielkości pozaelektromagnetycznych, do których zalicza się siły i momenty oddziałujące w maszynach elektrycznych, prędkości obrotowe oraz wielkości wibracyjne i temperaturę (w różnych punktach maszyny). Oczywiście wszelkie efekty mechaniczne i termiczne mają źródło w wielkościach pola elektromagnetycznego i w następstwie napięć i prądów w obwodach elektrycznych maszyn. Należy przy tym podkreślić, że sygnały wielkości mechanicznych i termicznych stanowią bazę sygnałów diagnostycznych maszyn elektrycznych. Natomiast wyniki pomiaru momentu obrotowego i prędkości obrotowej stanowią o stanie pracy maszyny i przetwarzanej w niej mocy, ale zestawiane są w kontekście charakterystyk wielkości elektrycznych.

Sygnały momentu obrotowego są mierzone przez przetworniki sprzężone z odpowiednio przystosowanymi układami obciążającymi badaną maszynę. Ze względu na ewentualne luzy w konstrukcji sprzęgnięcia maszyn i ustroju konstrukcyjnego

zamocowania przetworników siły lub momentu konieczne jest przyrządowe zniwelowanie luzów, ale również skompensowanie tak zwanego offsetu w strukturze panelu tego toru pomiarowego. Ponadto tor pomiaru siły (momentu) wymaga niejednokrotnie kalibracji i skalowania.

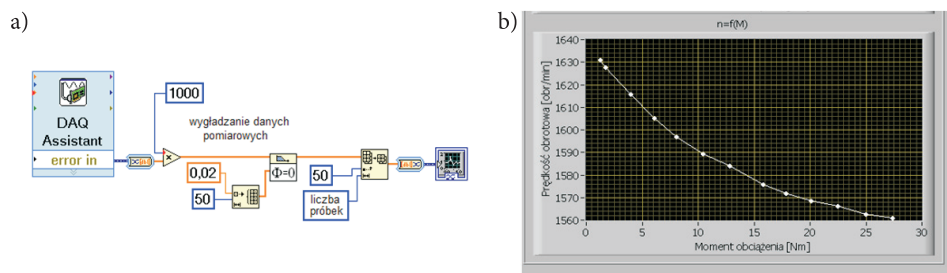
Prędkość obrotowa mierzona jest natomiast za pośrednictwem prędniczek tachometrycznych, przetworników indukcyjnych lub fotooptycznych. Zatem sygnał pierwotny prędkości może być sygnałem analogowym lub dyskretnym.

Na rysunku 16 przedstawiono panel pomiarowy siły mierzonej na wysięgniku dźwigni do wyznaczenia momentu obrotowego oraz diagram charakterystyki momentu rozruchowego silnika.



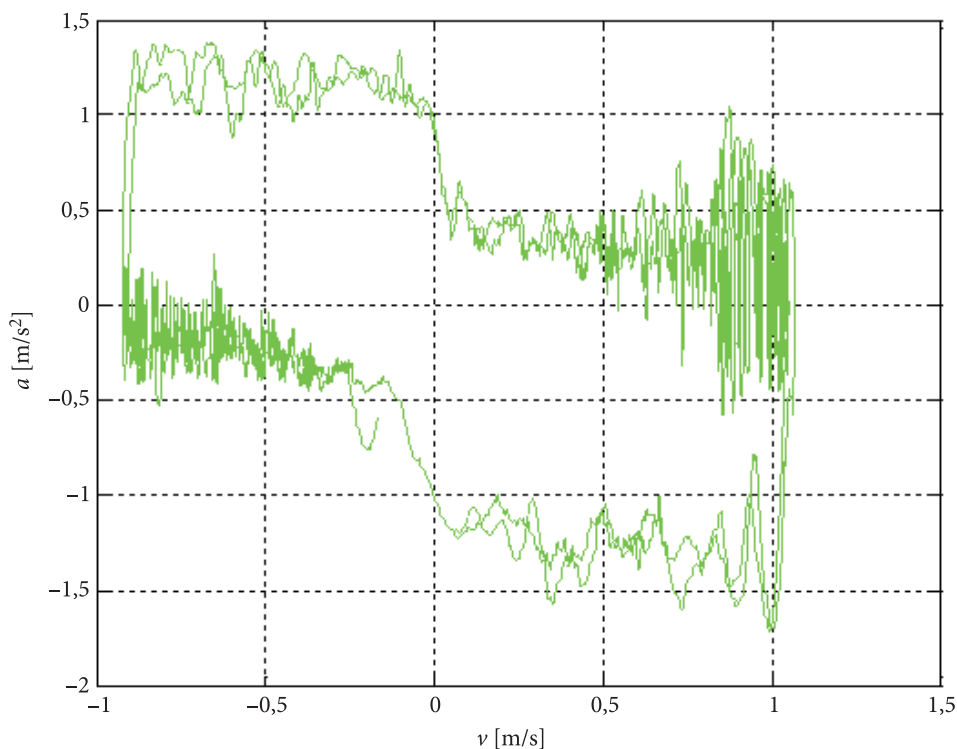
Rys. 16. a) Diagram pomiarowy siły, b) panel charakterystyki momentu siły

Na rysunku 17 przedstawiono schemat diagramu do pomiaru prędkości obrotowej z przetwornika indukcyjnościowego oraz panel ilustrujący charakterystykę mechaniczną (prędkości obrotowej w funkcji momentu) silnika prądu stałego.



Rys. 17. a) Diagram pomiarowy prędkości obrotowej, b) panel charakterystyki mechanicznej — zależność prędkości od momentu obciążenia silnika

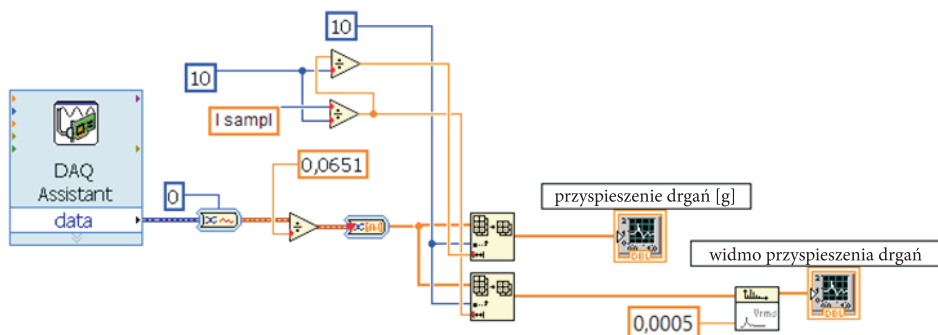
Na rysunku 18 przedstawiono opracowaną kinematyczną trajektorię fazową stanu dynamicznego silnika liniowego w ruchu nawrotnym. Określony portret fazowy formułuje się na podstawie mierzonej prędkości ruchu postępowego i obliczonego (w bloku operacyjnym pochodnej) przyspieszenia w cyklach nawrotnych.



Rys. 18. Portret fazowy kinematyki silnika liniowego w ruchu nawrotnym

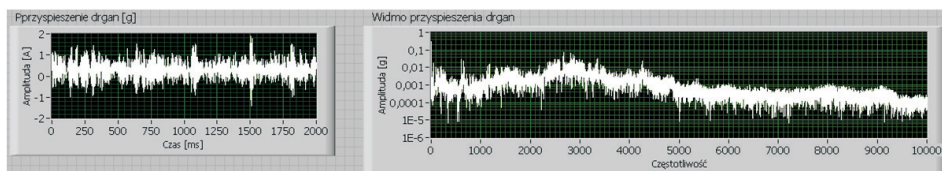
Spośród pomiarów mechanicznych w maszynach elektrycznych szczególne znaczenie pod względem fizycznym, jak również od strony oprzyrządowania i opracowywania wyników mają badania stanu wibracyjnego tych maszyn. System CAM (*Computer Aided Measurement*) z zastosowaniem graficznego języka programowania typu LabVIEW jest w tym przypadku nie do przecenienia. Przede wszystkim ze względu na uproszczenie torów pomiarowych, osprzętu pomiarowego i analizy w czasie rzeczywistym wielkości całkowitego sygnału pierwotnego. Ponadto system pomiarowy tych wielkości można w dużym stopniu zunifikować dla szerokiego zakresu parametrów mierzonych sygnałów i w odniesieniu do maszyn o szerokim zakresie parametrów eksploatacyjnych (mocy, napięcia prądu, prędkości itp.).

Na rysunku 19 przedstawiono diagram toru pomiarowego z przetwornikiem czołowym na bazie akcelerometru piezoelektrycznego. Za pośrednictwem kolejnych operatorów całkowych wyznacza się przebiegi prędkości i przemieszczeń drgań.



Rys. 19. Diagram toru pomiarowego przyspieszeń drgań

Na rysunku 20 przedstawiono panel pomierzonych przyspieszeń drgań i ich widmo częstotliwościowe.



Rys. 20. Panel z monitorem przebiegu i widmem częstotliwościowym przyspieszenia drgań

## 7. Wnioski i uwagi końcowe

Głównym walorem opracowanego systemu pomiarowego jest możliwość wykonywania pomiarów z wysoką dokładnością i w szerokim zakresie wartości podstawowych mierzonych sygnałów, które obejmują przykładowe przedziały wartości mierzonych wielkości:  $U \in \langle 20-500 \rangle$  V,  $I \in \langle 0,5-30 \rangle$  A,  $F \in \langle 10-1000 \rangle$  N. Istnieje możliwość rozszerzenia tych zakresów w przypadkach zmian związanych z oprzyrządowaniem stanowiska pomiarowego i oprogramowania systemu.

Należy również zauważyć, że na obecnym etapie aplikacji środowiska metrologicznego LabVIEW powinna nastąpić unifikacja torów pomiarowych dla wybranych mierzonych sygnałów w reprezentacji tego środowiska, co niewątpliwie

podwyższyłoby efektywność kompozycji diagramów. Architektura paneli uwarunkowana jest pomysłowością projektantów, ale także pewne elementy mogłyby być zunifikowane [7, 10].

Zaprezentowany system pomiarowy do badań diagnostycznych maszyn elektrycznych jest bardzo operatywnym systemem w odniesieniu do bardzo zróżnicowanego zbioru mierzonych sygnałów oraz sposobów ich opracowywania i analizy. Zmiana czujników pomiarowych pod względem typu lub parametrów znamionowych wymaga nieznacznych modyfikacji torów pomiarowych — tylko w części początkowej. Ewentualnie dokonuje się nieznacznych zmian parametrów skalowania w części wirtualnej. Szczególnie ważnym walorem tego rodzaju systemu pomiarowego jest prawie nieograniczona możliwość archiwizacji wyników pomiarów i to zarówno po stronie sygnałów „źródłowych”, jak również form przetworzonych sygnałów dyskretnych, a także odtworzonych przebiegów czasowych i wykresów charakterystyk. Dzięki bazie zarchiwizowanych wyników można tworzyć zbiory sygnałów diagnostycznych dla celów porównawczych i klasyfikować różnego rodzaju niesprawności występujące w maszynie. W sytuacji wysokiej operatywności tego typu systemu i łatwego dostosowania do różnych typów maszyn i programów ich badań eksperymentalnych wskazane byłoby przyjęcie normatywnie usankcjonowanych standardów w zakresie technicznym i programistycznym.

Przedstawiony system pomiarowy może być oczywiście przystosowany do badania maszyn prototypowych czy pomiarów maszyn elektrycznych po remontach lub przeglądach.

Artykuł opracowany na podstawie referatu *System pomiarowy do badań diagnostycznych maszyn elektrycznych* wygłoszonego na X Krajowej Konferencji „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów DIAG'19”, Augustów 20-24 maja 2019 r.

Praca finansowana z Projektu Badawczego Statutowego Politechniki Warszawskiej nr 504/G1043/0686 - 2016 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 28.02.2020 r. Zatwierdzono do publikacji 20.03.2020 r.

Włodzimierz Przyborowski <https://orcid.org/0000-0003-0583-3020>

Adam Biernat <https://orcid.org/0000-0002-1859-7234>

#### LITERATURA

- [1] BIERNAT A., *Analiza sygnałów diagnostycznych maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa, 2015.
- [2] BIERNAT A., PRZYBOROWSKI W., *System pomiarowy do badań diagnostycznych maszyn elektrycznych*, Konferencja naukowo-techniczna DIAG 2019. Augustów, 2019.
- [3] BIERNAT A., URBAŃSKI W., *Wirtualna technika pomiarowa w laboratoriach maszyn elektrycznych*, Napędy i Sterowanie, 5, 2012.
- [4] BISHOP R.H., *Learning with LabVIEW 8<sup>TM</sup>*, Pearson Prentice Hall, 2007.
- [5] CHRUŚCIEL M., *LabVIEW w praktyce*, Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2008.

- [6] DRABIK M., GIL A., *Wirtualne laboratorium pomiarowe*, Postępy Nauki i Techniki, 3, 2009.
- [7] DUSZA D., BARTOSZEWSKI J., *Metodyka projektowania przyrządów wirtualnych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 63, 2009.
- [8] KAMIŃSKI G., PRZYBOROWSKI W., BIERNAT A., SZCZYPIOR J., *Badania laboratoryjne maszyn elektrycznych*, OWPW, Warszawa, 2018.
- [9] PRZYBOROWSKI W., BIERNAT A., KUPIEC E., *System pomiarowy wspomagany komputerowo do laboratoryjnego badania trakcyjnych silników liniowych*, Logistyka, 6, 2014, 8934-8943.
- [10] RAK R., *Wirtualny przyrząd pomiarowy*, OWPW, Warszawa, 2003.

## A. BIERNAT, W. PRZYBOROWSKI

### Measuring system for comprehensive testing of electrical machines

**Abstract.** The article presents a measuring system designed for a comprehensive experimental testing of various types of electric machines. These tests include measurements of electrical, electromagnetic, kinematic, as well as mechanical and thermal quantities.

The basic measurements of electrical machines include currents and voltages in electrical circuits, including voltages on resistive and generally impedance elements of these circuits, and induced voltages. Depending on the machine class and type, the measured values are constant or change over time. Some magnitudes of electromagnetic transformations are measured in the area of machine construction. In addition, the parameters of the measured values of the type of signal discriminants (average, effective and maximum values) and their waveforms are presented.

Due to the wide range of machine state parameters, i.e. its state variables - in different load states, the multiplicity of these signals and the need to know their different characteristics, it becomes necessary to use individually adopted signal processing subsystems, i.e. signal acquisition systems, in the measuring systems. It is now possible thanks to the development in the CAM (Computer Aided Measurement) programming, for example using the graphical programming language of the integrated LabVIEW system. The article also presents examples of subsystems for the acquisition of measurements of non-electromagnetic signals like vibrational and acoustic ones generated in machines.

**Keywords:** electric machines, measurements, measuring system

**DOI:** 10.5604/01.3001.0014.2791