

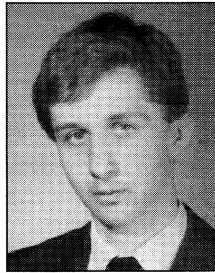
Andrzej GĘBURA, Paweł FALKOWSKI, Andrzej KOWALCZYK

INSTYTUT TECHNICZNY WOJSK LOTNICZYCH – WARSZAWA

Metrologiczne aspekty metody diagnostycznej FAM-C¹⁾

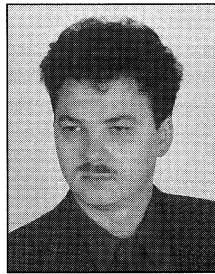
Mgr inż. Andrzej KOWALCZYK

– absolwent wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, specjalność Automatyka i Osprzęt. Jest pracownikiem Zakładu Osprzętu Lotniczego i Sprzętu Wysokościowo-ratowniczego Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie. Obszar zainteresowań obejmuje systemy eksperckie w awionice.



Mgr inż. Paweł FALKOWSKI

– absolwent wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, specjalność Automatyka i Osprzęt. Jest pracownikiem Zakładu Osprzętu Lotniczego i Sprzętu Wysokościowo-ratowniczego Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie. Obszar zainteresowań obejmuje systemy eksperckie w awionice.



Dr inż. Andrzej GĘBURA

– absolwent wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej, specjalność Automatyka i Osprzęt. Jest pracownikiem Zakładu Osprzętu Lotniczego i Sprzętu Wysokościowo-ratowniczego Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie. Obszar zainteresowań obejmuje diagnozowanie napędów lotniczych oraz systemów elektroenergetycznych.



ków prądnic lotniczych. Podczas wielu badań takich przypadków stwierdzono, że z reguły przyczyną urwań nie są wady prądnic, lecz nadmierne zużycie układu napędowego prądnicy - zużycie lub wady sprzęgieł i połączeń wielowpustowych. Przy dużych wartościach zużycia występują tzw. „nadwyżki dynamiczne”, które powodują chwilowe koncentracje naprężeń mechanicznych w pobliżu mas wirujących. Są one niekiedy tak znaczne, że powodują ukręcanie wałków. W związku z tym opracowano w ITWL metodę obserwacji zużycia zespołów napędowych

Streszczenie

W konferencjach: MWK'95 i MWK'97 autorzy przedstawili genezę, założenia, aplikację i fizykę zjawisk zachodzących w relacjach pomiędzy wadą ogniwa kinematycznego układu napędowego a parametrami modulacji częstotliwości napięcia wyjściowego prądnicy lotniczej. Metodę tą autorzy nazwali FAM-C.

W poniższym referacie autorzy pragną opisać metodę w postaci zależności matematycznych oraz, pokazać (w oparciu o zweryfikowany doświadczalnie materiał) możliwość pomiaru: kąta przekoszenia i wartości równoległego przesunięcia osi obrotu (mimośrodu) elementów napędu w stanie dynamicznym. Przeprowadzona zostanie analiza błędów pomiaru oraz zostaną przedstawione zobrażenia fazowe, umożliwiające określenie ww. wady montażowej i, co za tym idzie, jej zmniejszenie lub usunięcie.

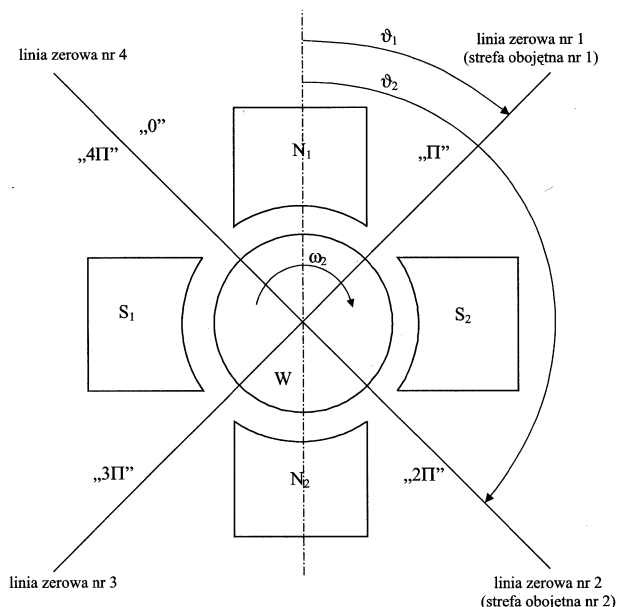
Abstract

In conferences MWK'95 and MWK'97 authors represented the genesis, assumption, application and physics of occurrences in relation between the defect of power transmission kinematic links and parameters of generator's output frequency modulation. This method authors have called FAM-C.

In this paper authors describe the method in form of mathematic dependences and measurement possibilities of skew angle and parallel displacement of axis of rotation (essentric's) of power transmission elements in dynamic state (basing on experimental material). The measuring error analysis will be realised as well as phase presentation providing qualification mentioned above assembly defects and consequently its reduction or repairing.

Wstęp

Elementy lotniczych skrzyń napędów ulegają zużyciu, które spowodowane jest procesami: tarcia, korozji, starzenia, zmęczenia materiałów itp.. Zespoły napędowe statków powietrznych, w tym skrzynie napędów agregatów, ulegają awariom. Część z nich objawia się urywaniem wałków napędowych m. in. wał-



Rys. 1. Maszyna prądu przemiennego z dwiema parami biegunów. N1, N2, S1, S2 - bieguny magnetyczne stojana prądnicy; linia zerowa (nr 1, 2, 3, 4) - strefa (linia) magnetycznie obojętna pola magnetycznego stojana prądnicy; θ_1 - kąt pomiędzy osią symetrii przekroju poprzecznego prądnicy a linią zerową nr 1, θ_2 - kąt pomiędzy osią symetrii przekroju poprzecznego prądnicy a linią zerową nr 2

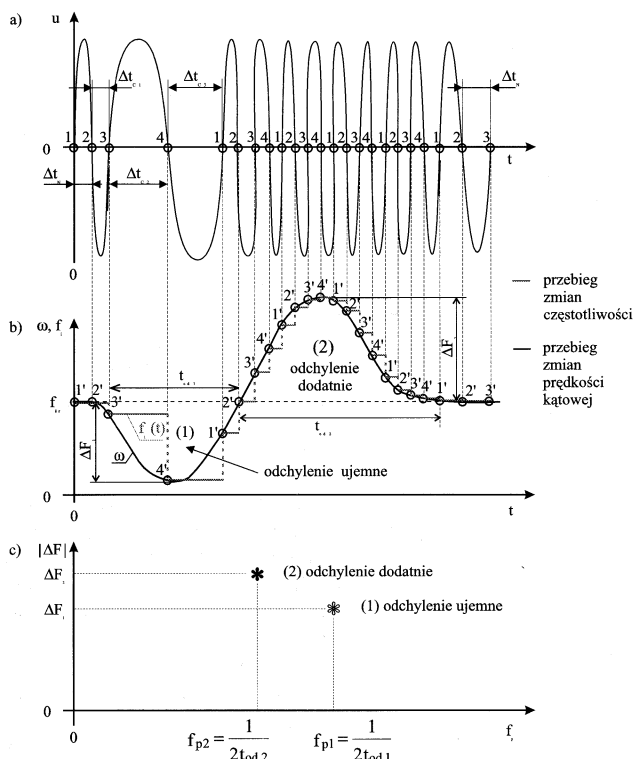
¹⁾ Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 7 T 07 B 00412

w trakcie pracy, bez przyłączania dodatkowych zewnętrznych czujników. Przetwornikami stają się tu „etatowe” prądnice montowane na zespole napędowym.

Prądnica źródłem informacji diagnostycznej – prezentacja metody FAM-C

Metoda FAM-C oparta jest na pomiarze modulacji częstotliwości napięcia wyjściowego prądnicy prądu przemiennego. Stosowana od kilku lat m.in. do diagnozowania skrzyń napędowych niektórych statków powietrznych.. Opiera się ona na założeniach:

- diagnostycznym – każda wada mechaniczna objawia się zmodulowaniem wyjściowej prędkości kątowej danej pary kinematycznej;
- metrologicznym:
 - linie magnetycznie obojętne (rys.1) nie zmieniają swojego położenia geometrycznego w czasie pomiaru;
 - rozdzielczość pomiarowa układu zliczającego przyrosty czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez zero (rys. 2) napięcia wyjściowego prądnicy jest wystarczająca do wykrycia zmiany zmodulowań założonego przyrostu wielkości wady.



Rys. 2. Sposób tworzenia punktów charakterystycznych na płaszczyźnie $(f_p, \Delta F)$.

a) zmiany napięcia wyjściowego w czasie, b) zmiany wejściowej prędkości obrotowej prądnicy i odwzorowujące je zmiany częstotliwości, c) odzwierciedlenie zmian częstotliwości na płaszczyźnie $(f_p, \Delta F)$

Pomiar częstotliwości chwilowej napięcia wyjściowego prądnicy

Do pomiaru częstotliwości chwilowej wykorzystano metodę pośrednią [1,2] poprzez pomiar przyrostów czasów pomiędzy sąsiednimi przejściami sygnału przez poziom napięcia $e(t) \rightarrow 0$. Odwrotność podwojonej wartości tego czasu jest poszukiwaną częstotliwością chwilową [1,2,3]. Z uwagi na to, że przebieg napięcia $e(t) = 0$ sinusoidalnie osiąga największy gradient [1,2], wywnioskowano, że prze-

bieg napięcia wyjściowego prądnicy będzie w tych miejscach najmniej zniekształcony. Przyrosty czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez poziom $e(t) = 0$ są obliczane poprzez zliczanie kolejnych paczek impulsów podstawy czasu o częstotliwości f_z (pierwsze karty liczników miały $f_z = 1.6 \text{ MHz}$ błąd pomiaru $\Delta t_z = 0.625 \mu\text{s}$). Maksymalny błąd bezwzględny przyrostu czasu Δt_z można wyrazić wzorem

$$\Delta t_z < 1/f_z \quad (1)$$

zaś maksymalny błąd względny:

$$\delta t_z \leq 2f_n/f_z \quad (2)$$

pomiar wartości chwilowej częstotliwości napięcia wyjściowego w czasie trwania obserwacji diagnostycznej można przedstawić na płaszczyźnie (f, t) (rys.2b). Obserwuje się wówczas zbiór punktów $\{f_i(t)\}$, $i=1,2,3,\dots,n$ (gdzie n - liczba obserwowanych półokresów napięcia wyjściowego prądnicy w czasie trwania pomiaru) W praktyce diagnostycznej zbiori te były postrzegane jako „przebieg zmian częstotliwości w czasie”.

Sposób tworzenia punktów na płaszczyźnie $(f_p, \Delta F)$

Obserwacje zmian częstotliwości w czasie $\{f_i(t)\}$ dostarczały licznych informacji diagnostycznych lecz wymagały przeglądania „długich przebiegów zmian częstotliwości w czasie” i notowania maksymalnych wartości częstotliwości (amplitud odchyżeń od częstotliwości średniej f_{sr}) i okresów zmodulowań. Szybka transformata Fouriera (FFT) zastosowana do takich przebiegów dostarczała tylko informacji o zjawiskach zmodulowań, cyklicznych, „gubiła” natomiast zmodulowania pojawiające się stochastycznie, a dostarczających istotnych informacji diagnostycznych. Dlatego też autorzy zdecydowali się na zupełnie inny sposób zobrazowania. Postanowiono mierzyć kolejne czasy odchylenia od częstotliwości odniesienia f_{sr} (gdzie $n=1,2,3,\dots$) otrzymano kolejne przyrosty czasu $\Delta t_{od1}, \Delta t_{od2}, \dots, \Delta t_{odk}$. Równocześnie mierzono odpowiadające im wartości odchylenia amplitudy częstotliwości od częstotliwości odniesienia f_{sr} : $\Delta F_1, \Delta F_2, \dots, \Delta F_k$. Odkładając na płaszczyźnie współrzędnych prostokątnych $(f_p, \Delta F)$ otrzymuje się zbiori punktów (rys. 2c). Punkty te tworzą skupienia, które autorzy nazwali zbiorami charakterystycznymi [4]. Jak stwierdzono eksperymentalnie każdy taki zbiór charakteryzuje różne wady dla różnych ogniw kinematycznych układu napędowego.

Warunki rozróżnialności badanego sygnału

Modulacja częstotliwości napięcia wyjściowego prądnicy zmierzona poprzez pomiar przyrostów czasu pomiędzy kolejnymi przejściami przez zero, jest dyskretnym obrazem zmodulowań prędkości kątowej wadliwych par kinematycznych zespołu napędowego. Przebieg częstotliwości napięcia wyjściowego prądnicy będzie więc dyskretnym obrazem przebiegu prędkości kątowej umownego zezwoju na wirniku prądnicy prądu przemiennego. Aby dana harmoniczna kątowej prędkości obrotowej ω_2 (rys. 2b) o pulsacji modulującej ω_m ($\omega_m = \pi/t_{od}$) była rozróżnialna, to znamionowy czas dyskretyzacji prądnicy tj. znamionowy przyrost czasu pomiędzy są-

2) pomimo, że pojęcie to zgodnie z teorią [5,6] jest stosowane dla funkcji liniowej a nie dyskretnej.

3)
$$f_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\Delta t_{odi}}$$

4) $f_{pk} = 1/(2\Delta t_{odk})$

siednimi liniami magnetycznie obojętnymi (rys. 1) powinien spełniać równanie, zgodne ze zmodyfikowanym twierdzeniem Kotelnikowa-Shannona

$$\Delta t \leq t_{od}/2.5 \quad (3)$$

Wzór ten jest słuszny dla małych odchyłek chwilowej prędkości od znamionowej. Dla większych amplitud odchyłek można zastosować wzór warunkujący spełnienie rozróżnialności harmonicznej prędkości obrotowej wirnika prądnicy $\{\Delta t_{ei}\}_{\min} \leq t_{od}/2.5$.

Prążek kinematyczny

W pracach autorów zaproponowano stworzenie pojęcia prążka kinematycznego i bazowej częstotliwości. Częstotliwością bazową oblicza się na podstawie danych uzyskanych ze schematu kinematycznego układu napędowego:

$$f_p = k_n \cdot n_N / 60 \quad (4)$$

gdzie:

n_N – znamionowa prędkość obrotowa danej pary kinematycznej [obr/min];

k_n – współczynnik zależny od typu wady ogniwa kinematycznego ($k_n=1$ – mimośrodowość, $k_n=2$ – przekoszenie, $k_n=0.5$ – złożenie przekoszenia i mimośrodowości, $k_n=z$ – luzy międzyzębne, gdzie z – liczba zębów).

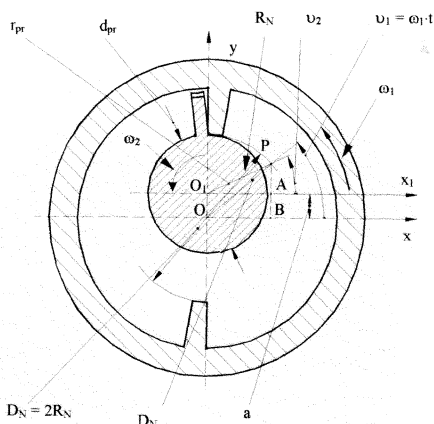
Prążek kinematyczny jest linią pionową przeprowadzoną przez f_p o wartości określonej wzorem (4). Służy on do identyfikacji zbiorów charakterystycznych z parami kinematycznymi przedstawionymi na schemacie kinematycznym.

Mimośrodowość połączeń elementów jako przykład quasi-metrycznych właściwości metody FAM-C

W badaniach na zespołach napędowych zarówno laboratoryjnych jak i kompleksowych (na pokładach statków powietrznych) stwierdzono ściśle zależność wysokości zbiorów charakterystycznych określoną jako:

$$W\Delta F = |\{\Delta F_i\}_{\min}| + |\{\Delta F_i\}_{\max}| \quad (5)$$

Od wartości mimośrodowości „a”. Postanowiono zależności te ująć matematycznie. Przyjęto model kinematyczny połączenia jednowypustowego zgodnie z rys. 3.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny połączenia wałka prądnicy z tuleją napędową przy równoległym przesunięciu ich osi (mimośrodowość) D_N – średnica gniazda napędu, D_{pr} – średnica wałka prądnicy, A – wartość mimośrodowości, O_1 – oś obrotu wałka prądnicy

Kąt chwilowego położenia wirnika prądnicy (u_2) wyznaczono ze wzoru:

$$\operatorname{tg}(u_2) = PA/O_1A \quad (6)$$

stosując kolejne przekształcenia otrzymano wzór na u_2 :

$$u_2 = \ar \operatorname{ctg} \frac{D_N \sin \omega_1 t - 2a}{D_N \cos \omega_1 t} \quad (7)$$

Po zróżniczkowaniu i przekształceniu wartość chwilowej prędkości może być przedstawiona jako:

$$\omega_2(t) = \frac{D_N \omega_1}{D_N - 2a \sin \omega_1 t} \quad (8)$$

Przekształcając otrzymamy:

$$\frac{\Delta \omega_2}{\omega_N} = \frac{4a}{D_N} \quad (9)$$

Ponieważ:

$$\frac{\Delta \omega_2}{\omega_{sr}} = \frac{|\{\Delta F_i\}_{\max}| + |\{\Delta F_i\}_{\min}|}{f_{sr}} \quad (10)$$

więc zakładając, że $\omega_{sr} = \omega_N$ otrzymamy wzór na mimośrodowość:

$$a = \frac{D_N}{4} \cdot \frac{|\{\Delta F_i\}_{\max}| + |\{\Delta F_i\}_{\min}|}{f_{sr}} \quad (11)$$

Portret fazowy jako zobrazowanie przestrzenne ruchu pary kinematycznej

Analiza wysokości zbiorów charakterystycznych na płaszczyźnie ($f_p, \Delta F$) dostarcza informacji o wielkości wady np. o wartości mimośrodu, który może być wyznaczony ze wzoru (11). Takie zobrazowanie nie dostarcza danych o kierunku geometrycznego przemieszczenia się elementów, które byłyby niezbędne do ewentualnego skorygowania wady. Jeśli do wzoru (8) zamiast $\omega_1 t$ podstawimy kąt obrotu wirnika prądnicy φ (rys. 1) to otrzymamy zobrazowanie zmian prędkości kątowej obrotu (ω_2) w funkcji kąta obrotu:

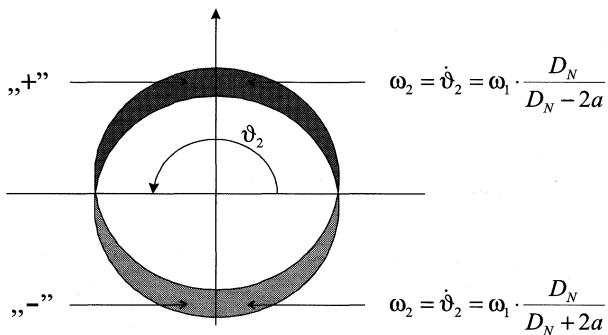
$$\omega_2(\varphi) = [DN\omega_1] / [DN - 2a \sin \varphi] \quad (12)$$

przedstawione na rys. 4. Można w ten sposób stworzyć wzorcowy portret fazowy.

Dokonując analizy chronologicznej pojawiania się punktów ($f_{pi}, \Delta F_i$) w zbiorze charakterystycznym zlokalizowanym dla danej pary kinematycznej wiedząc, że przejście przez zero sygnału $u(t)$ odpowiada położeniu sygnału umownej ramki wirnika przez pole magnetycznie obojętne (rys.1) można wyznaczyć zobrazowanie amplitudowo fazowe danej pary kinematycznej przedstawione na rys.5. Jeżeli równoległe do tych danych dostarczony będzie sygnał np. z czujnika fotooptycznego o położeniu elementów zespołu napędowego względem położenia przestrzennego, to łatwo będzie taką wadę skorygować.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono, w dużym skrócie, kilkuletni dorobek autorów dotyczący możliwości pomiarowo-diagnostycznych metody FAM-C. Aby móc skutecznie diagnozować i mierzyć (w przybli-



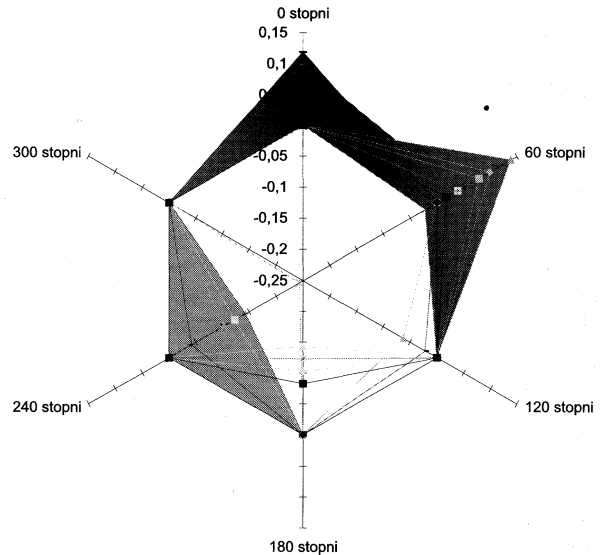
Rys. 4. Wykres kołowy zmian wartości chwilowej prędkości kątowej przy mimośrodkowym połączeniu wałów

zeniu) wartości niektórych wad autorzy wykonali wiele badań na obiektach rzeczywistych oraz opracowali szereg analiz matematycznych. Konieczność zapewnienia szybkości diagnozowania spowodowała:

- opracowanie dla tej metody zobrazowań w postaci zbiorów charakterystycznych;
- wyznaczenia częstotliwości bazowych i prędkości kinematycznych;
- wyznaczanie zobrazowań amplitudowo-fazowych dla poszczególnych par kinematycznych zespołu napędowego.

Literatura


- [1] A. WOJNAR, T. ZDZIEBORSKI: „Analiza błędów anomalnych w cyfrowych pomiarach częstotliwości”; Biuletyn WAT nr 2 (258), luty 1974.
- [2] A. WOJNAR: „Statyczna analiza przejść przez zero w teorii sygnałów”; Prace instytutu Tele- i Radiotechnicznego, 1965, t.9, nr 3, str.3.
- [3] M. PERRY: „A correlation approach to time-frequency representation”; Proceeding of the IEEE-SP international symposium. Victoria BC, Canada, 4-6 October 1992.



Rys. 5. Zobrazowanie amplitudowo – fazowe mimośrodu wałka prądniczy SGO-8 (prędkość f_p ok. 65Hz) otrzymane z pomiaru częstotliwości napięcia wyjściowego prądniczy SGO-8. Prądnica GSR-ST-12000WT jako dodatkowa masa wirująca. Mimośród sprzęgła $a = 0,42$ mm. Bez obciążenia mechanicznego

- [4] P. LINSTEDT, A. GĘBURA: „Diagnozowanie napędów lotniczych w oparciu o analizę parametrów prądniczy”; 5-th International Conference „Aircraft and helicopters diagnostic AIRDIAG'97”.
- [5] R. KATNER, L. ENOCHSON: „Analiza numeryczna szeregów czasowych”; WNT, Warszawa 1978.
- [6] W. KRYSICKI, L. WŁODARSKI: „Analiza matematyczna w zadaniach”; PWN, Warszawa 1993.

Artykuł recenzowany



Rok założenia 1987

PRZEDSIĘBIORSTWO INNOWACYJNO - WDROŻENIOWE "SPAIS" S.A.

80-391 Gdańsk
ul. Kołobrzeska 43
tel. (0-58) 553-42-30
fax (0-58) 553-41-70

- ☛ Czujniki pomiarowe ciśnienia, różnicy ciśnień
- ☛ Czujniki pomiarowe poziomu metodą hydrostatyczną
- ☛ Czujniki pomiarowe siły (ścisk., rozciąganie), masy
- ☛ Czujniki pomiarowe temperatury (półprzewodnikowe)
- ☛ Wagi hakowe z wyświetlaczem cyfrowym, siłomierze
- ☛ Układy wagowe - przemysłowe
- ☛ Układy zabezpieczenia udźwigu żurawi
- ☛ Układy pomiarowe temperatury (Pt100 i K-NiCr/Ni)
- ☛ Układy pomiaru poziomu cieczy w zbiornikach otwartych i zamkniętych
- ☛ Przetworniki pomiarowe iskrobezpieczne (Ex)
- ☛ Przetworniki pomiarowe z wyjściem cyfrowym
- ☛ Zasilacze, mierniki cyfrowe, układy progowe
- ☛ Zestawy pomiarowe - kasetowe (standard 19") z odczytem cyfrowym i wyjściem RS 232C, RS 485

**Dostawy w krótkich terminach ✓ uruchomienie i serwis
✓ projektowanie i produkcja układów pomiarowych i automatyki
wg indywidualnych potrzeb Odbiorcy**

**OFERTA W ZAKRESIE SYSTEMÓW
AUTOMATYZACJI PRZEDSIĘBIORSTW
PRODUKCYJNYCH**

Rozwiązania kompleksowe

- zintegrowany system sterowania i wizualizacji procesów przemysłowych
- modułowy system zarządzania produkcją VPPS (MRP II) niemieckiej firmy infor

Systemy automatyzacji firmy SIEMENS

- sterowniki programowalne rodziny SIMATIC S5 i S7
- systemy wizualizacji COROS
- sieci przemysłowe SIMATIC NET (PROFIBUS, AS-I)

Realizacja i wdrażanie

- systemy automatyzacji urządzeń przemysłowych
- systemy sterowania i monitorowania produkcji
- systemy wizualizacji procesów



41-500 CHORZÓW, ul. Długa 1
tel. (0-32) 246 44 22, 246 41 71, 246 25 91
fax (0-32) 246 44 22 w. 100
e-mail: office@iss.katowice.pl
<http://www.iss.katowice.pl>