

Mirosław WERSZKO¹⁾, Radosław WERSZKO²⁾

POLITECHNIKA WROCLAWSKA

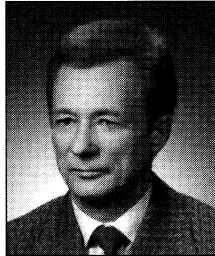
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW,¹⁾

INSTYTUT KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN, ZAKŁAD PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN I TRIBOLOGII²⁾

Model pneumatycznego czujnika ciśnienia wewnątrzczaszkowego

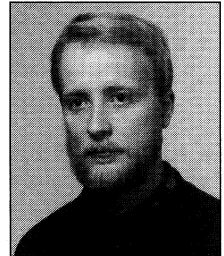
Prof.dr hab.inż. Mirosław WERSZKO

– jest kierownikiem Zakładu Automatyki Procesów Termooenergetycznych w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej.



Dr inż. Radosław WERSZKO

– jest adiunktem w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej.



Streszczenie

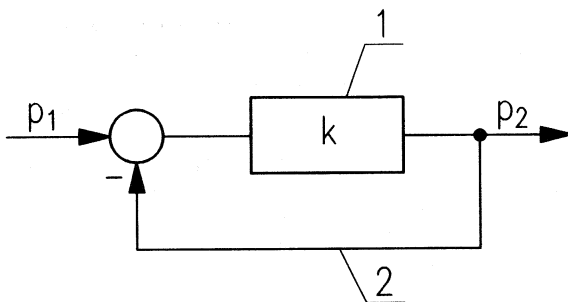
Opisano model matematyczny pneumatycznego czujnika ciśnienia wewnątrzczaszkowego, opartego na miniaturowym wzmacniaczu typu dysza-przysłona, objętym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Opracowany model ma postać transmitancji widmowej i jest przeznaczony do badania stabilności oraz do kompensacji dynamicznej czujnika. Model został zweryfikowany za pomocą doświadczalnych charakterystyk częstotliwościowych modelowanego czujnika.

Abstract

The mathematical model of the pneumatic intracranial pressure sensor, based on the miniature nozzle-flapper amplifier with negative feedback is described. The formulated model is in the form of the sinusoidal transfer function and will be used for stability investigation and dynamic compensation of the sensor. The model has been verified by means of the experimental frequency characteristics.

Wstęp

Praca dotyczy modelu matematycznego, opracowanego na Politechnice Wrocławskiej, pneumatycznego czujnika ciśnienia wewnątrzczaszkowego jednorazowego użytku. Jego konstrukcja była przedstawiona na I Sympozjum „Modelowanie i Pomiary w Medycynie” [3]. Czujnik działa na zasadzie kompensacji ciśnień, a jego budowa opiera się na pneumatycznym wzmacniaczu typu dysza-przysłona objętym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Schemat strukturalny takiego układu przedstawiono na rysunku 1. Występuje tu wzmacniacz typu dysza-przysłona 1 o współczynniku wzmocnienia k oraz linia ujemnego sprzężenia zwrotnego 2. Ciśnienie p_1 jest ciśnieniem mierzonym (wewnątrzczaszkowym), a p_2 - ciśnie-



Rys. 1. Uproszczony schemat strukturalny pneumatycznego czujnika ciśnienia wewnątrzczaszkowego

niem wyjściowym (kompensacyjnym). Zależność między ciśnieniami p_1 i p_2 jest określona równaniem:

$$p_2 = \frac{k}{1+k} p_1, \quad (1)$$

w którym wyrażenie $k/(1+k)$ odgrywa rolę statycznego współczynnika przetwarzania. Aby uzyskać jak największą zgodność pomiędzy wartościami ciśnień p_1 i p_2 , współczynnik ten musi być bliski jedności, a to oznacza, że współczynnik wzmocnienia k winien być możliwie duży. Jak jednak wiadomo, praca wzmacniacza o zbyt dużym współczynniku wzmocnienia k może okazać się niestabilną. W przypadku rozpatrywanego czujnika ta niestabilność objawia się drganiami membrany o niewielkiej amplitudzie i stosunkowo wysokiej (akustycznej) częstotliwości. Wynikiem tego jest „postrzępienie” krzywej przebiegu w czasie sygnału wyjściowego oraz pojawienie się słyszalnego piszczenia. Na marginesie należy zauważyć, że takie „piszczące” czujniki pojawiają się sporadycznie i są eliminowane podczas wzorcowania.

Aby lepiej poznać wymienione zjawisko i móc mu zapobiegać, opracowano model matematyczny czujnika, traktowanego jako człon dynamiczny o sygnale wejściowym p_1 i wyjściowym p_2 .

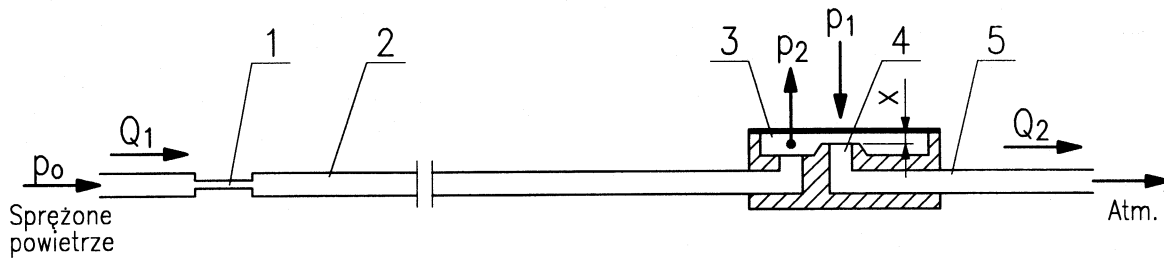
Ponieważ do badania stabilności czujnika wybrano metodę częstotliwościową (kryterium Nyquista), model czujnika ma postać transmitancji widmowej:

$$G(j\omega) = \frac{p_2(j\omega)}{p_1(j\omega)}, \quad (2)$$

gdzie: $p_1(j\omega)$ i $p_2(j\omega)$ - transformaty Fouriera zmiennych w czasie ciśnień p_1 i p_2 , uzyskane przy rozpatrywaniu czujnika w tzw. stanie rozwartym, czyli bez sprzężenia zwrotnego; ω - pulsacja ciśnień, j - jednostka liczb urojonych.

Schematy zastępcze i równania czujnika

Budowę czujnika można przedstawić schematem zastępczym pokazanym na rys. 2. W skład czujnika wchodzi: dławik 1, przewód zasilający 2, membrana 3, na którą z zewnątrz działa ciśnienie mierzone p_1 , a od wewnątrz ciśnienie kompensujące (wyjściowe) p_2 , dysza 4, przemykana przez membranę 3 i przewód odpowietrzający 5. Jak wiadomo, dławik 1 wraz z dyszą 4 i membraną 3 tworzą wzmacniacz typu dysza-przysłona, a zmiany ciśnienia p_1 wywołują zmiany ciśnienia p_2 , traktowanego jako miara ciśnienia p_1 .



Rys. 2. Schemat zastępczy czujnika

Pierwszym etapem pracy jest znalezienie zależności funkcyjnej pomiędzy ciśnieniem wyjściowym p_2 i wejściowym p_1 czujnika w stanie rozwartym:

$$p_2 = f(p_1) \quad (3)$$

Przy czym ze względu na wygodę dalszych rozważań model czujnika będzie składał się oddzielnie z opisu wzmacniacza typu dysza-przysłona:

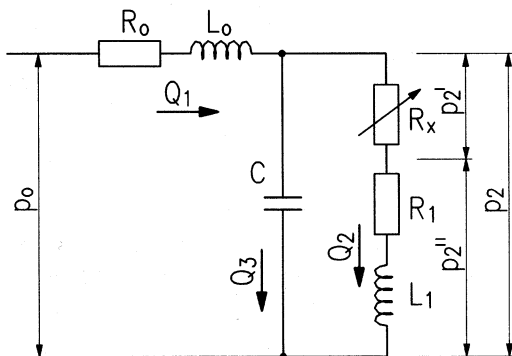
$$p_2 = f_1(x) \quad (4)$$

i membrany

$$x = f_2(p_1) \quad (5)$$

gdzie: x - położenie membrany.

Korzystając z analogii elektro-pneumatycznej i przyjmując, że oporności, pojemności i indukcyjności pneumatyczne są parametrami skupionymi, wzmacniacz typu dysza-przysłona można przedstawić za pomocą schematu pokazanego na rys. 3. Na schemacie tym oporność R_0 i indukcyjność L_0 dotyczą dławika łączącego z przewodem zasilającym, a pojemność C - przewodu zasilającego. Przez R_x oznaczono oporność szczeliny pomiędzy membraną i krawędzią dyszy, a oporność i indukcyjność przewodu odpowietrzającego - odpowiednio przez R_1 i L_1 . Wielkości Q_1 , Q_2 i Q_3 są natężeniami przepływu powietrza, a p_0 i p_2 - ciśnieniami: zasilania i wyjściowym.



Rys. 3. Schemat zastępczy wzmacniacza typu dysza-przysłona

Układ z rysunku 3 można opisać następującymi równaniami:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (6)$$

$$p_2 = p_2' + p_2'' \quad (7)$$

$$p_0 - p_2 = R_0 Q_1 + L_0 \frac{dQ_1}{dt} \quad (8)$$

$$p_2'' = R_1 Q_2 + L_1 \frac{dQ_2}{dt} \quad (9)$$

$$Q_3 = C \frac{dp_2}{dt} \quad (10)$$

$$Q_2 = \alpha(x) \pi d x \sqrt{2\rho p_2'} \quad (11)$$

Nieliniowe równanie (11) określa zależność pomiędzy strumieniem powietrza Q_2 , przepływającym przez szczelinę pomiędzy membraną i krawędzią dyszy, a położeniem membrany x i spadkiem ciśnienia p_2' na wymienionej szczelinie. W równaniu tym $\alpha(x)$ oznacza współczynnik przepływu, będący funkcją położenia membrany x , a d i ρ - odpowiednio średnicę dyszy i gęstość powietrza. Równanie (11) zostało zlinearyzowane w okolicy punktu pracy o współrzędnych: x_0 , p_{20}' i $Q_{10} = Q_{20}$:

$$\Delta Q_2 = \left. \frac{\partial Q_2}{\partial x} \right|_{x_0, p_{20}'} \Delta x + \left. \frac{\partial Q_2}{\partial p_2'} \right|_{x_0, p_{20}'} \Delta p_2' \quad (12)$$

Ponieważ zależność $\alpha(x)$ nie ma postaci analitycznej, stałe współczynniki równania (12) wyznaczono doświadczalnie. Współczynnik $\partial Q_2 / \partial p_2'$ ma sens odwrotności oporności szczeliny przy zadanym położeniu membrany x_0 ; oznaczono go jako $1/R_x$. Natomiast współczynnik $\partial Q_2 / \partial x$ oznaczono przez $1/k_x$.

Transmitancje czujnika

Transmitancja wzmacniacza typu dysza-przysłona

Przechodząc na przyrosty wielkości zmiennych względem punktu pracy oraz dokonując transformacji Laplace'a, równania opisujące wzmacniacz otrzymują postać:

$$\Delta Q_1(s) = \Delta Q_2(s) + \Delta Q_3(s) \quad (13)$$

$$\Delta p_2(s) = \Delta p_2'(s) + \Delta p_2''(s) \quad (14)$$

$$-\Delta p_2(s) = \Delta Q_1(s)(R_0 + sL_0) \quad (15)$$

$$\Delta p_2''(s) = \Delta Q_2(s)(R_1 + sL_1) \quad (16)$$

$$\Delta Q_3(s) = sC\Delta p_2(s) \quad (17)$$

$$\Delta Q_2(s) = \frac{1}{k_x} \Delta x(s) + \frac{1}{R_x} \Delta p_2'(s) \quad (18)$$

Z przytoczonych wyżej równań wyznaczono transmitancję operatorową wzmacniacza typu dysza-przysłona:

$$\frac{\Delta p_2(s)}{\Delta x(s)} = \frac{k_o(1 + sT_4)}{T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (19)$$

gdzie:

$$k_o = \frac{R_o R_x}{(R_o + R_x + R_1)k_x} \quad \text{- współczynnik wzmocnienia}$$

$$T_3^3 = \frac{L_o L_1 C}{R_o + R_x + R_1} \quad \text{- stała czasowa w trzeciej potędze}$$

$$T_2^2 = \frac{R_o C L_1 + R_x C L_o + R_1 C L_o}{R_o + R_x + R_1} \quad \text{- stała czasowa w drugiej potędze}$$

$$T_1 = \frac{R_o R_x C + R_o R_1 C + L_o + L_1}{R_o + R_x + R_1} \quad \text{- stała czasowa}$$

$$T_4 = \frac{L_o}{R_o} \quad \text{- stała czasowa różniczkowania}$$

s - operator transformacji.

Po przejściu do transmitancji widmowej i wydzieleniu jej części rzeczywistej $Re(\omega)$ i urojonej $Im(\omega)$ otrzymujemy poszukiwany model częstotliwościowy wzmacniacza typu dysza-przysłona:

$$\frac{\Delta p_2(\omega)}{\Delta x(\omega)} = Re(\omega) + j Im(\omega) \quad (20)$$

gdzie:

$$Re = \frac{k_o(1 - T_2^2 \omega^2 + T_1 T_4 \omega^2 - T_3^3 T_4 \omega^4)}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega - T_3^3 \omega^3)^2}$$

$$Im = \frac{k_o[\omega(T_4 - T_1) + \omega^3(T_3^3 - T_2^2 T_4)]}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega - T_3^3 \omega^3)^2}$$

$\omega = 2\pi f$ - pulsacja przemieszczeń przysłony (membrany),

f - częstotliwość,

j - jednostka liczb urojonych.

Transmitancja membrany

Membrana sprężysta przy niewielkich jej ugięciach może być traktowana jako człon oscylacyjny o równaniu

$$T^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx}{dt} + x = kp_1 \quad (21)$$

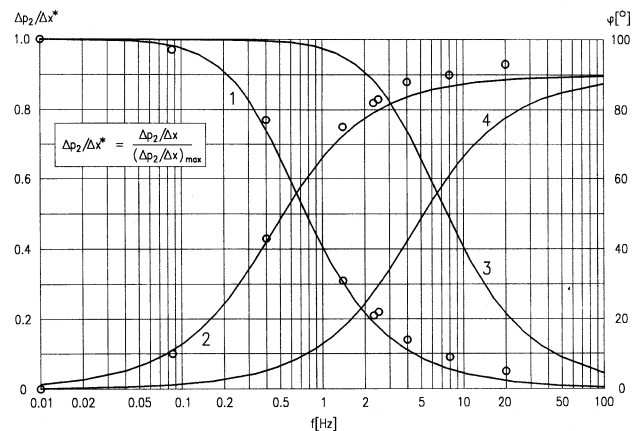
lub transmitancji widmowej w postaci:

$$\frac{\Delta x(j\omega)}{\Delta p_1(j\omega)} = \frac{(k - T^2 \omega^2)}{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2\xi T \omega)^2} - j \frac{2k\xi T \omega}{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2\xi T \omega)^2} \quad (22)$$

Stałe współczynniki tej transmitancji wyznaczono doświadczalnie: współczynnik wzmocnienia k - z charakterystyki statycznej, a stałą czasową T i współczynnik tłumienia ξ - z charakterystyki impulsowej. Wartości tych współczynników, odnoszące się do stosowanej obecnie membrany, wynoszą $k = 5,60 \times 10^{-8}$ m/Pa; $T = 0,4$ ms i $\xi = 0,2$.

Charakterystyki częstotliwościowe czujnika

Weryfikację opracowanego modelu wzmacniacza typu dysza-przysłona przeprowadzono na trzech kopiach (modelach fizycznych) rzeczywistego wzmacniacza. W oparciu o wymiary poszczególnych elementów wybranego wzmacniacza, najpierw obliczono stałe współczynniki transmitancji (20) [1], a następnie wyznaczono charakterystyki: amplitudowo-częstotliwościową i fazowo-częstotliwościową (rys. 4). Na osi poziomej znajdują się wartości częstotliwości f sinusoidalnych przemieszczeń x przysłony wzmacniacza, natomiast na lewej osi pionowej - wartości stosunku amplitud $\Delta p_2/\Delta x$ odniesione do maksymalnej wartości tego stosunku, występującej w warunkach ustalonych (statycznych); na prawej osi pionowej są naniesione wartości kątów opóźnień fazowych ϕ , występujących pomiędzy sinusoidalnymi przebiegami przemieszczeń x i ciśnienia p_2 .



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe czujnika

Krzywa 1 jest przykładową charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową, a krzywa 2 - fazowo-częstotliwościową wzmacniacza o parametrach: średnica dyszy 0,8 mm, dławik w postaci kapilary o średnicy 0,2 mm i długości 20 mm, przewód zasilający o średnicy 2,5 mm i długości 1,5 m. Na tle tych krzywych kółkami zaznaczono punkty uzyskane ze wstępnych badań wzmacniacza na stanowisku pomiarowym. Punkty te, jak widać, leżą dość blisko krzywych w zakresie niższych częstotliwości, a większe rozbieżności pojawiają się dopiero przy wyższych częstotliwościach, gdzie traci ważność założenie, że parametry wzmacniacza są skupione.

Krzywe 1 i 2 w zakresie częstotliwości od 0 do 100 Hz mogą być traktowane jako charakterystyki całego czujnika (łącznie z membraną) ponieważ w wymienionym zakresie częstotliwości względny stosunek amplitud membrany $\Delta x/\Delta p_1^* = 1$, a kąt opóźnienia fazowego j jest bliski zera.

A zatem, jak wynika z przebiegu krzywej 1 (rys. 4) częstotliwość przenoszenia czujnika wynosi ok. 0,1 Hz. Należy jednak zauważyć, że w rutynowych pomiarach ciśnienia wewnątrzczaszkowego najważniejsza jest tylko jego wartość średnia oraz tendencja jej zmiany [2]. Z tego też względu przy opracowywaniu czujnika główny nacisk położono na jego dokładność statyczną, co jak wiadomo nie idzie w parze z dokładnością dynamiczną.

Ta niska stosunkowo częstotliwość przenoszenia czujnika jest wywołana głównie przez dławik łącznie z przewodem zasilającym, którego minimalna długość wynosi 1,5 m. Dla przykładu liniami 3 i 4 (rys. 4) zaznaczono charakterystyki czujnika, w którym zas-

tosowano kapilarę o dwukrotnie krótszej długości i przewód zasila-
jący o ok. dwukrotnie mniejszej średnicy w stosunku do wcześniej
rozpatrywanego przykładu. Jak widać, częstotliwość przenoszenia
nowego czujnika jest dziesięciokrotnie większa ale niestety, jego
dokładność statyczna wykracza poza dopuszczalne ramy.

Podsumowanie i wnioski

Opracowany model częstotliwościowy pneumatycznego czujni-
ka ciśnienia wewnątrzczaszkowego dość dobrze odzwierciedla
dynamiczne własności rzeczywistego czujnika w pasmie częstotli-
wości od 0 do ok. 2 Hz. Ze względu jednak na nieliniową charak-
terystkę statyczną wzmacniacza typu dysza-przysłona jest on ważny
w niewielkim zakresie zmienności ciśnień Δp_1 i Δp_2 w okolicy punktu
pracy czujnika. Dlatego też do opisu dynamicznych własności czujni-
ka w całym jego zakresie pomiarowym należy korzystać z kilku trans-
mitancji (20), różniących się między sobą wartościami współczyn-
ników R_x i k_x , wyznaczanych z charakterystyk doświadczalnych.
Opracowano specjalny program komputerowy, który umożliwia wyz-
naczanie charakterystyk częstotliwościowych czujnika o dowolnych
parametrach i w dowolnym punkcie jego charakterystyki statycznej.

Obecnie, opracowany model jest wykorzystywany między innymi
do optymalizacji niektórych wymiarów czujnika i do korekcji jego
własności dynamicznych, w tym do poprawy stabilności pracy.

Literatura

- [1] B. CHOROWSKI, M. WERSZKO: Mechaniczne Urządzenia Automatyki;
Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990.
- [2] H. JUNIEWICZ: Komputerowy system monitorowania ciśnienia per-
fuzyjnego. Pomiary Automatyka Kontrola 1999 nr 7.
- [3] M. WERSZKO, R. WERSZKO: Wrocławskie czujniki ciśnienia wewnątrz-
czaszkowego. Pomiary Automatyka Kontrola 1999 nr 7.

Artykuł recenzowany



VIGO SYSTEM Sp. z o.o.
ul. Wyki 11A 01-318 Warszawa
tel. (22) 6661406, 6661410
e-mail: info@vigo.com.pl



Dostarczamy najwyższej jakości aparaturę pomiarową:

- pirometry ręczne i stacjonarne firmy Raytek
- przetworniki wilgotności firmy Vaisala
- przetworniki punktu rosy od -100 do +100C d.p.
- kamery termowizyjne
- barometry o dokładności 0,1hPa, 0,2hPa i 0,5hPa
- przetworniki stężenia CO, CO₂ i CH₄
- mierniki mocy promieniowania podczerwonego
- rejestratory cyfrowe i papierowe

Produkujemy:

- detektory promieniowania podczerwonego
- termografy
- powłoki optyczne dla potrzeb optyki technicznej

Zapewniamy:

- atrakcyjne warunki współpracy dla pośredników
i dystrybutorów
- ciekawe promocje, zawsze aktualne na naszej
stronie internetowej: www.vigo.com.pl
- serwis, niezbędne świadectwa,
kompletację dostaw

OPTIMUS-SEKO



Autoryzowane Centrum Szkolenia
GE FanucAutomation

zaprasza na kursy
obsługi i programowania sterowników PLC
firmy GE Fanuc:

- Logicmaster 90-kurs podstawowy część 1.
- Logicmaster 90-kurs podstawowy część 2.
- Seria 90-30-kurs zaawansowany
- VersaPro-kurs podstawowy część 1.
- VersaPro-kurs podstawowy część 2.
- VersaPro-kurs uzupełniający



Zajęcia są prowadzone przez doświadczoną kadrę
w laboratorium wyposażonym w 8 stanowisk.
Informacji udziela Gabriela Grzechnik, "OPTIMUS-SEKO"
43-300 Bielsko-Biała, ul. Jutrzenki 20
tel. (033) 814 01 01, fax (033) 814 00 71
<http://www.seko.com.pl>, e-mail: osek@onet.pl

OPTIMUS-SEKO



VIGO SYSTEM Sp. z o.o.
ul. Wyki 11A 01-318 Warszawa
tel. (22) 6661406, 6661410
e-mail: info@vigo.com.pl



Dostarczamy najwyższej jakości aparaturę pomiarową:

- pirometry ręczne i stacjonarne firmy Raytek
- przetworniki wilgotności firmy Vaisala
- przetworniki punktu rosy od -100 do +100C d.p.
- kamery termowizyjne
- barometry o dokładności 0,1hPa, 0,2hPa i 0,5hPa
- przetworniki stężenia CO, CO₂ i CH₄
- mierniki mocy promieniowania podczerwonego
- rejestratory cyfrowe i papierowe

Produkujemy:

- detektory promieniowania podczerwonego
- termografy
- powłoki optyczne dla potrzeb optyki technicznej

Zapewniamy:

- atrakcyjne warunki współpracy dla pośredników
i dystrybutorów
- ciekawe promocje, zawsze aktualne na naszej
stronie internetowej: www.vigo.com.pl
- serwis, niezbędne świadectwa,
kompletację dostaw



INSTYTUT SYSTEMÓW STEROWANIA
ul. DŁUGA 1-3,41-506 CHORZÓW
tel. (+48 32) 247 28 20, fax: (+48 32) 246 25 91
e-mail: office@iss.pl <http://www.iss.pl>

OFERTA ISS:

AUTOMATYKA PRZEMYSŁOWA

- ✓ SNEL - system sterowania i nadzoru elektrofiltrow
- ✓ KSAW - system automatyzacji ważenia
- ✓ Stacja prób silników elektrycznych
- ✓ System monitorowania i sterowania węzłów sieci ciepłowniczej

AUTOMATYZACJA BUDYNKÓW

- ✓ SABIO - inteligentny system automatyzacji budynku

ZARZĄDZANIE PRODUKCJĄ

- ✓ QS - system sterowania jakością produkcji

SIECIOWE SYSTEMY INFORMATYCZNE

- ✓ SIB - System Informacyjny Biura
- ✓ Systemy wideokonferencji