

# Konduktometr na PSoC

## AVT-5114

Pomiar konduktancji przewodnika wykonanego z materiału stałego jest w zasadzie dość prosty. W przypadku cieczy-elektrolitów sprawę komplikują zjawiska elektrochemiczne zachodzące podczas przepływu przez nią prądu. W niniejszym artykule zapoznamy Czytelników z jedną z najprostszych metod pomiaru konduktowności na przykładzie systemu zaimplementowanego w układzie PSoC.

### Rekomendacje:

artykuł wbrew pozorom nie jest przeznaczony wyłącznie dla specjalistów zajmujących się na co dzień pomiarami przewodności cieczy – zaprezentowana metoda pomiarowa z pewnością zainteresuje szersze grono Czytelników, a sam konduktometr może być przyrządem przydatnym w wielu ciekawych eksperymentach.



### PODSTAWOWE PARAMETRY

- Płytko o wymiarach: 106x66 mm
- Zasilanie 8...12 VDC
- Typ sondy pomiarowej: N5750
- Zakres pomiaru: 65 mS/m
- Zastosowanie: pomiar konduktowności wody wodociągowej



Z założenia układ służy do pomiaru przewodności wody wodociągowej. Zakres jej przewodności właściwej jest rzędu dziesiątek mS/m. Mówiąc konduktometr będziemy mieli na myśli miernik przewodności właściwej (konduktowności), a nie konduktancji. Konduktowność jest wyrażona w S/m lub jednostkach pochodnych (najczęściej używa się  $\mu\text{S}/\text{cm}$  oraz  $\text{mS}/\text{cm}$ ), natomiast konduktancja jest wyrażona w siemensach. Przez pomiar konduktowności rozumiemy pomiar średniej konduktowności bądź zmian konduktowności np. cieczy.

W przedstawionym projekcie wykorzystano dwuelektrodową sondę konduktometryczną N5750. Sonda ta jest wykonana ze stali nierdzewnej 1H18N9T. Głowica (sonda) może służyć do pomiaru przewodności właściwej w zakresie od  $10^{-5}$  do  $2 \cdot 10^{-2}$  S/m. Wytrzymała, trwała i odporna na czynniki chemiczne może pracować w sposób ciągły, jako sonda zanurzeniowa oraz jako przepływowa. Zbudowana jest z dwóch cylindrycznych elektrod stalowych odizolowanych od siebie wkładką z teflonu. W elektrodzie wewnętrznej jest umieszczony czujnik temperatury – termistor NTC 10 k $\Omega$ . Stała K głowicy wynosi  $2 \pm 20\%$  m $^{-1}$ , przy sygnale pomiarowym prostokątnym 70 Hz w wodzie o przewodności 1 mS. Dla użytego egzemplarza stała  $K=1,86$  m $^{-1}$ . Standardowo współpracuje ona z przetwornikiem N5741, który przetwarza

konduktancję (właściwie to rezystancję) roztworu na znormalizowany sygnał elektryczny prądowy z zakresu 4...20 mA lub 0...5 mA oraz napięciowy 0...1 V. Otrzymany w ten sposób sygnał elektryczny można już dowolnie przetworzyć. Jednakże sonda pracując z tym przetwornikiem mierzy przewodność do ok. 1 mS/m. Konieczne stało się rozszerzenie zakresu pomiarowego na przedział przewodności wody wodociągowej tj. do ok. 65 mS/m.

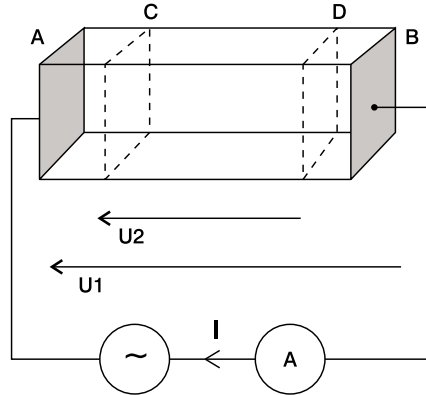
Wyjście poza górny, znamionowy zakres mierzonej konduktancji sondy może wpłynąć na zwiększenie całkowitego błędu pomiarowego. Jednak, w tym zastosowaniu otrzymana dokładność jest wystarczająca do zgrubnego określenia przewodności wody wodociągowej.

### Zastosowania i zjawiska

Pomiary przewodności cieczy są szeroko stosowane zarówno w przemyśle, jak i w praktyce laboratoryjnej. Coraz częściej wykorzystywane są np. w oceanografii w celu określenia zasolenia oraz stopnia zanieczyszczenia wody morskiej. Na ich podstawie można również określić jakość i przebieg procesu technologicznego. Ciągły i szybki pomiar przewodności wody przemysłowej może nieść szereg informacji służących do kontroli danego procesu. W przemyśle chemicznym poprzez pomiar przewodności właściwej można określić stężenie wodnych roztworów kwasów, zasad czy soli.

Pomiary małych wartości przewodności pomocne są przy określeniu jakości wody zdemineralizowanej oraz destylowanej. Trudno sobie wyobrazić pracę wielu układów automatyki bez wody o odpowiedniej czystości. Wymienię tylko branżę energetyczną, farmaceutyczną, mikroelektroniczną czy spożywczą. Jako ciekawostkę wspomnę o metodzie określenia zawartości tłuszczu w mleku na podstawie jego przewodności [2]. Metoda ta dobrze sprawdza się w zakresie zawartości tłuszczu od 0,15% do 51% z dokładnością nie gorszą od 0,8%. Pomiary wody opadowej, gruntowej czy głębinowej mogą określić stopień zanieczyszczenia gruntu. Kolejnym bardzo ważnym i perspektywicznym zastosowaniem konduktometrii są pomiary w medycynie. Przykładowo na podstawie przewodności rozcieńczonego roztworu krwi można określić zawartość hematokrytu.

Pomiary przewodności, ze względu na niekorzystne zjawiska występujące przy pomiarach prądem stałym, w większości przypadków wykonywane są przy użyciu sygnałów przemiennych. Zapobiega to występowaniu elektrolizy roztworu oraz gromadzeniu się ładunków bardzo blisko powierzchni elektrod. Nagromadzenie ładunków w sposób znaczący pogarsza dokładność pomiarów poprzez wzrost rezystancji szeregowej elektrod. Częstotliwość sygnału nośnego jest uzależniona od zakresu mierzonej konduktancji. Dla małych przewodności, od mikrosiemensów do milisiemensów, częstotliwość ta zwykle zawiera się w paśmie akustycznym. W tym przypadku pomija się niejednorodność badanego ośrodka-ciecży. Przy pomiarach konduktometrycznych bardzo ważne jest uwzględnienie wpływu zmian temperatury. Elektrolity wraz ze wzrostem temperatury zwiększają przewodność w zakresie od 1 do 3%/°C. Dodatkowym utrudnieniem jest nieliniowy charakter tych zmian. Nawet charakterystyki wody dejonizowanej w zależności od stopnia zanieczyszczenia silnie się różnią. W warunkach przemysłowych należy te zmiany kompensować w torze pomiarowym (sprzętowo), bądź korygować po stronie cyfrowej (programowo), np. przez odpowiednie tablice dla danego roztworu. Tablice te zazwyczaj są wielowymiarowe (co najmniej trójwymiaro-



Rys. 1. Metoda dwuelektrodowa (zaznaczono również elektrody C i D dla met. czteroelektrodowej)

we), przez co znacznie komplikują obliczenia. W przedstawionym projekcie założono, że wszystkie pomiary odbywają się w temperaturze odniesienia  $t=25^{\circ}\text{C}$ .

### Metoda pomiarowa

Układ wykorzystuje metodę dwuelektrodową. Zasadę pomiaru przedstawiono na rys. 1. Można powiedzieć, że źródło zasilające polaryzuje elektrody A i B sondy zanurzonej w cieczy przewodzącej. Wyznaczenie przewodności cieczy dokonuje się poprzez pomiar prądu w obwodzie zasilanym przez źródło napięciowe, bądź napięcia między elektrodami A i B, jeżeli zastosowano źródło prądowe. Polaryzacja elektrod prowadzi do powstania warstwy PWE (podwójnej warstwy elektrycznej) oraz innych procesów elektrodowych zwiększających rezystancję szeregową elektrod [2]. Metody wieloelektrodowe w znacznym stopniu eliminują wspomnianą wadę. Sonda czteroelektrodowa jest zbudowana bardzo podobnie, z tym że elektrody A i B nie pełnią już roli elektrod pomiarowych. Napięcie wykorzystywane przy pomiarze pochodzi z elektrod napięciowych C i D umieszczonych poza strefą niekorzystnych zjawisk przy elektrodach prądowych polaryzujących A i B.

Stała K zależy od geometrii i konfiguracji elektrod, częstotliwości oraz kształtu napięcia zasilającego głowicę. Schemat zastępczy głowicy jest dość rozbudowanym czwórnikiem, którego moduł impedancji jest silnie zależny od częstotliwości.

Rys. 1 ilustruje jedynie ideę pomiaru. Rzeczywiste układy pomiarowe są niejednokrotnie bardzo skom-

plikowane. Prócz generatora nośnej zawierają dzielniki zakresów wraz ze wzmacniaczami pomiarowymi, kompensatory temperatury roztworu, mostki pomiarowe (metoda cztero-elektrodowa), układy fazoczułe, bądź demodulatory, precyzyjne prostowniki oraz układy wyjściowe współpracujące z innymi urządzeniami np. rejestratorami czy miernikami.

Wychodząc od podstawowego równania w konduktometrii [2]:

$$R_{\text{roztworu}} = R_x = K/\kappa \quad (1)$$

gdzie

K- stała głowicy (współczynnik kształtu) wrażany w  $\text{m}^{-1}$

$\kappa$ -(kappa) konduktywność roztworu  $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$

Po przekształceniu powyższej formuły otrzymujemy:

$$\kappa = (1/R_{\text{roztworu}}) \cdot K = G_{\text{roztworu}} \cdot K \quad (2)$$

Prezentowany układ opiera się na pomiarze spadku napięcia na dzielniku rezystancyjnym zbudowanym z rezystancji wzorcowej  $R_{\text{ref}}$  oraz sondy konduktometrycznej (reprezentowanej jako  $R_x$ ). Ostateczna zależność pozwalająca wyznaczyć konduktywność wygląda następująco:

$$\kappa = (1/R_{\text{ref}}) \cdot [(V_0 - V_1)/(V_1 - V_2)] \cdot K = G_{\text{ref}} \cdot (\text{nap1}/\text{nap2}) \cdot K \quad (3)$$

gdzie

$\text{nap1} = V_0 - V_1$  -> napięcie na rezystorze wzorcowym

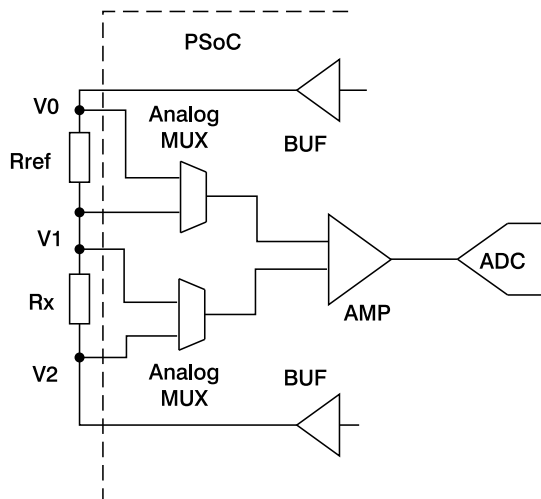
$\text{nap2} = V_1 - V_2$  -> napięcie na czujniku konduktometrycznym

$$R_{\text{ref}} = 100 \Omega \quad 1\%$$

$$K = 1,86 \text{ m}^{-1} = 0,0186 \text{ cm}^{-1}$$

Dzięki tej metodzie można mierzyć rezystancję, konduktancję, a po przeskalowaniu przez stałą K konduktywność roztworu. Zastosowany różnicowy pomiar napięć eliminuje problem napięć niezrównoważenia wejściowych układów mikrokontrolera PSoc dodających się do sygnału użytecznego.

Na rys. 2 przedstawiono zasadę pomiaru rezystancji znając postać sygnału wymuszającego, w najprostszym przypadku jest to napięcie stałe. W przedstawionym projekcie jest to napięcie prostokątne. Poprzez wartość rezystancji  $R_{\text{ref}}$  można dzięki pomiarom pośrednim (pomiar napięcia) określić wartość rezystancji (czy konduktancji) danego rezystora czy roztworu. Sygnał przemienny przy pomiarach małych rezystancji, bądź przewodności cieczy stosuje się w celu eliminacji niekorzystnych zjawisk. Z tych względów stosuje się różne techniki pomiarowe. Jedną z nich jest metoda Lock-in. Jest to metoda bazująca na odpo-



Rys. 2. Zasada działania: idea implementacji w układzie PSoC (nota kat. AN2028)

wiedniej modulacji, selektywnym wzmacnieniu i demodulacji sygnału pomiarowego. Przedstawione rozwiązanie początkowo miało być oparte o pomiar sygnału wykorzystujący tę metodę, jednakże problemy implementacyjne uniemożliwiły to. Głównym problem okazały się filtry analogowe zbudowane z przełączanych pojemności.

### Kilka zdań o układzie PSoC

W projekcie został zastosowany mikrokontroler PSoC CY8C29466 firmy Cypress. Posiada on 8-bitową jednostkę centralną o architekturze harwardzkiej. Na dzisiejsze czasy jej możliwości są raczej skromne, choć rdzeń można taktować do 24 MHz, a bloki cyfrowe mogą mieć sygnał zegarowy do 48 MHz. Instrukcje mają zmienną długość od 1 do 3 bajtów. Czas wykonywania jednej instrukcji zawiera się w przedziale od 4 do 13 cykli dla instrukcji LJMP i wejścia w procedurę obsłu-

gi przerwania (15 dla specjalnej instrukcji SSC). Przy programowaniu w assemblerze dysponujemy akumulatorem A, wskaźnikiem stosu SP, rejestrem wskaźnikowym X, rejestrem flag F oraz rejestrami indeksowymi i oczywiście stronicowaną pamięcią RAM, w zależności od wersji o pojemności od 2 kB. Dysponujemy również stronicowanym obszarem rejestrów specjalnych. Służą one do konfiguracji wszystkich bloków wewnętrznych oraz np. do obsługi sprzętowej mnożarki 8-bitowej. Pamięć programu może mieć do 32 kB z możliwością

wydzielenia do 2 kB na pamięć EEPROM. Sam rdzeń, jak i jego assembler, jest nieco podobny do klasycznej '51.

Cechą charakterystyczną tych układów niespotykaną w innych są konfigurowalne bloki cyfrowe i analogowe. Bloki cyfrowe są ułożone w wiersze, a analogowe w kolumny. Każdy wiersz składa się z 4 bloków. Dwa bloki DBBXX mogą pełnić prostsze funkcje cyfrowe, a dwa DCBXX mogą służyć jeszcze jako bloki komunikacyjne. Jest to jeden z nielicznych mikrokontrolerów, który na „pokładzie” może mieć do czterech układów UART. Jedna kolumna analogowa jest zbudowana z trzech bloków. Jeden jest blokiem linowym ciągłym, dwa następne są zbudowane na przełączanych pojemnościach. Z wyżej wymienionych bloków można budować różne układy analogowe, cyfrowe i mieszane. Począwszy od prostych timerów, poprzez wzmacniacze instrumentalne, kończąc na szerokiej gamie przetworników analogowo-cyfrowych. Warto wspomnieć również o dynamicznej rekonfiguracji wewnętrznych bloków podczas pracy. Przykładowo wewnątrz układu można zaimplementować automat, bądź inne urządzenie, które np. raz na dobę przekonfiguruje się w pełni funkcjonalny modem, a po dokonaniu wymiany danych wróci do konfiguracji podstawowej.

Jedną z największych bolączek użytkowników układów PSoC jest brak darmowego kompilatora C. Na dzień dzisiejszy jest tylko jeden i to płatny kompilator C firmy ImageCraft, choć w najbliższym czasie

jest planowana premiera nowego kompilatora firmy Hi-tech na rdzeń M8C. Jeżeli wierzyć zapowiedziom kod wynikowy ma być o 40% mniejszy od starszego kompilatora. Nowy kompilator opiera się na metodach stosowanych w jednym z najlepszych kompilatorów C na układy z serii PIC18 firmy Microchip.

Cały projekt napisano w assemblerze przy użyciu programu PSoC Designer. Jest to darmowe narzędzie wspomagające pracę z układami firmy Cypress. Użytkownik może korzystać z trzech modułów: edytora programu, edytora wewnętrznych bloków cyfrowych i analogowych oraz debuggera. Program ten zawiera zestaw gotowych podzespołów, które można zbudować z bloków cyfrowych i analogowych. Są to zdefiniowane urządzenia wewnętrzne takie jak przetworniki, timery, wzmacniacze itp. Taki moduł oprócz części sprzętowej (konfiguracja połączeń i bloków) zawiera część programową. Jest to zestaw odpowiednich procedur służących do konfiguracji i obsługi danego wewnętrznego urządzenia. Programista budując własną aplikację dysponuje już pewnym szkieletem programu oraz procedurami obsługi sprzętu. Poza tym część programu generowana jest automatycznie. Pomimo tych udogodnień programowanie w assemblerze niesie ze sobą pewne utrudnienia, które początkowo mogą bardzo zniechęcać. Związane jest to z kompatybilnością wstecz predefiniowanych modułów. Problem jest związany z modelem pamięci procesora. Korzystając z dużego modelu pamięci (LMM – *Large Memory Model*) nawet dość rozbudowane programy, ale bez aktywnych przerw nie sprawiają większych problemów. Sytuacja komplikuje się, gdy korzystamy z przerw, co zdarza się nader często, ponieważ wykorzystanie dowolnego przetwornika wiąże się z obsługą przerwania. Należy wtedy w odpowiedni sposób zabezpieczyć aktualnie wykorzystywane rejestry służące jako wskaźniki oraz numer strony pamięci RAM z danymi. Wbrew pozorom nie jest to łatwe. W momencie przejścia do procedury obsługi przerwania aktywną stroną staje się strona zerowa. Niektóre gotowe procedury wykorzystywane w modułach zostały napisane dla starszych serii mikrokontrolerów PSoC i nie wspierają

#### WYKAZ ELEMENTÓW

##### Rezystory

REE: 1 kΩ  
RS\*: 0...50 Ω  
R\_REF: 100 Ω 1%

##### Kondensatory

C1, C3: 100 μF/63 V  
C2, C4: 100 nF

##### Półprzewodniki

IC1: CY8C29446-24PI  
IC2: 7805

##### Inne

Gniazdo zasilające  
Głowica AK500/2  
Wyświetlacz LCD (HD44780)

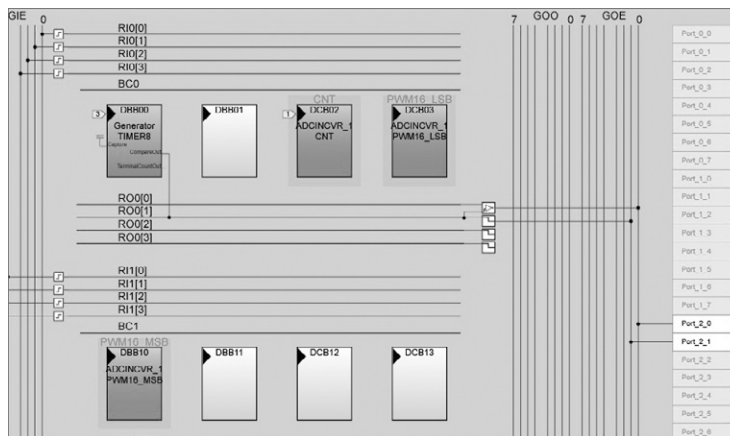




z  $f=1,5$  MHz. Jako źródło sygnału zegarowego wykorzystano wewnętrzny układ oscylatora.

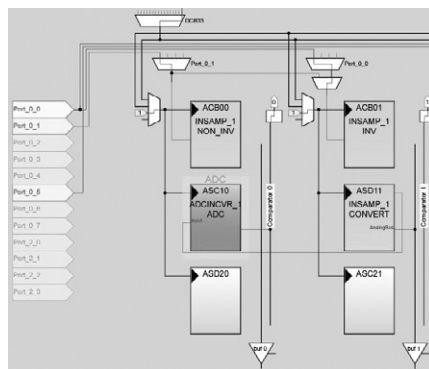
Tor pomiarowy to przede wszystkim wzmacniacz instrumentalny o wzmacnieniu równym 1. Składa się z dwóch wzmacniaczy operacyjnych (ACB00 i ACB01) oraz bloku przetwarzającego ASD11. Cały ten blok może mieć wzmacnienie od 1 do 93. Na wzmacnienie końcowe składa się wzmacnienie różnicowe z zakresu 2 do 48 oraz wzmacnienie układu przetwarzającego od 0,0313 do 1,938 w ponad 30 krokach. Daje to całkiem spory zbiór możliwych do wyboru wzmacnień. Ponadto na bieżąco w programie można je zmieniać. Multiplexery analogowe służą do podłączenia odpowiednich potencjałów na wejście wzmacniacza, gdzie następuje wzmacnienie odpowiednich napięć (różnicy potencjałów). Przełączanie odbywa się w procedurze obsługi przerywania przetwornika analogowo-cyfrowego. Przetwornik jest zbudowany z czterech bloków. Blok wejściowy jest blokiem analogowym (ASC10). Pozostałe to bloki cyfrowe. Dwa to 16-bitowy blok PWM (DCB03 i DBB10). Ostatni cyfrowy blok pełni funkcję sterującą pracą przetwornika (DCB02). Dalsze przetwarzanie sygnału odbywa się już programowo zgodnie z wcześniej przedstawionymi zależnościściami.

Projekt jest podstawową implementacją metody pomiaru przewodności właściwej wody. Ze względu



Rys. 5. Matryca PSoC - część cyfrowa

na pracochłonność przy programowaniu w asemblerze nie uwzględnia on wpływu zmiany temperatury oraz np. kalibracji urządzenia poprzez zmianę stałej sondy. Powyższe utrudnienia nie miałyby większego znaczenia, gdyby program został napisany w języku programowania wysokiego poziomu. Główną zaletą implementacyjną projektów opartych na układach PSoC jest minimalna liczba potrzebnych komponentów zewnętrznych. Nie jest potrzebny na-



Rys. 6. Matryca PSoC: część analogowa

wet rezonator kwarcowy. Dodatkowo można układy te programować bezpośrednio w systemie.

### Montaż i uruchomienie

Schemat konduktometru przedstawiono na rys. 3, a jednostronną płytkę drukowaną na (rys. 4) Moduły cyfrowe i analogowe matrycy PSoC przedstawiono na rys. 5 i 6. Lutowanie nie powinno

następować żadnych problemów. Płytkę wykonano w technologii przewlekanej. Montaż tradycyjnie rozpoczynamy od najmniejszych elementów takich jak zwory, rezystory itd. W układ można wlotować podstawkę pod procesor. Po sprawdzeniu pracy stabilizatora, w podstawkę można włożyć zaprogramowany mikrokontroler. Układ nie wymaga uruchamiania. Dodatkowo rezystor  $R_s$  pełni rolę ogranicznika prądu. Jego wartość nie jest krytyczna, jednakże nie powinna przekraczać  $50 \Omega$ , ze względu na dodatkowy błąd przy pomiarach przewodności większych niż  $20 \text{ mS/m}$ . Zamiast  $R_s$  można wlotować zworę, gdy pobór prądu nie ma większego znaczenia. W takiej sytuacji układ pobiera prąd o natężeniu ok.  $50 \text{ mA}$ .

Bardziej dociekliwym czytelnikom pragnącym poszerzyć swoją wiedzę na wyżej wymienione tematy polecam literaturę, szczególnie monografię [2]. Zawiera ona szczegółowy opis wszystkich wspomnianych w artykule zjawisk. Zawiera również elementy fizyki i chemii niezbędne do pełnego przedstawienia istoty pomiarów konduktometrycznych.

**Grzegorz Stec  
KNE**

Literatura:

- [1] „Przetwornik konduktometryczny N5741–Instrukcja obsługi” MERA Wrocław
- [2] „Pomiary przewodności elektrycznej cieczy przy małych częstotliwościach” Moroń Z.
- [3] „Sonda konduktometryczna N5750”– Nota katalogowa
- [4] „Ohmmeter”AN2028 Cypress

R
E
K
L
A
M
A



**Renomowany producent drukarek INK-JET oferuje wysokiej klasy**

**Aktywny detektor podczerwieni do zastosowań w układach automatyki i zabezpieczeń**

- małe wymiary budowy (M18x1)
- duża odporność na zakłócenia
- wbudowany wskaźnik zadziałania
- wyjście odporne na zwarcie
- wykonania PNP, NPN



**EBS Ink- Jet Systems Poland Sp. z o.o.**  
ul. Tarnogajska 13, 50-512 Wrocław  
tel. (071) 367 04 11, fax (071) 373 32 69