dr inż. Stanisław Bocian
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR"

Inteligentna technika w systemach pomiarowo-sterujących do urządzeń pojazdów szynowych (1)

W artykule opisano rozwój inteligentnych technik pomiarowych oraz czujniki i przetworniki we współczesnej technice pomiarowej. Przedstawiono sposób kondycjonowania sygnałów, w szczególności z wykorzystaniem inteligentnych kondycjonerów. Opisano struktury sieciowe systemów pomiarowo-sterujących w inteligentnych węzłach z wykorzystaniem systemów mikroprocesorowych. Przedstawiono sposób komunikacji między inteligentnymi węzłami sieciowymi tzn. między komputerową jednostką nadrzędną typu MASTER a sterownikami mikroprocesorowymi podrzędnymi typu SLAVE. Szczegółowo analizowano współpracę sterowników mikroprocesorowych wykorzystywanych do budowy inteligentnych podzespołów mechatronicznych w procesach pomiarowo-sterujących. Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego KBN nr 8T12C 068 20 „Inteligentne podsystemy mechatroniczne w procesach diagnostycznych i sterowanie hamowaniem pojazdów szynowych".

CZĘŚĆ I
CZUJNIKI, KONDYCJONERY I PRZETWORNIKI W INTELIGENTNEJ TECHNICE POMIAROWEJ

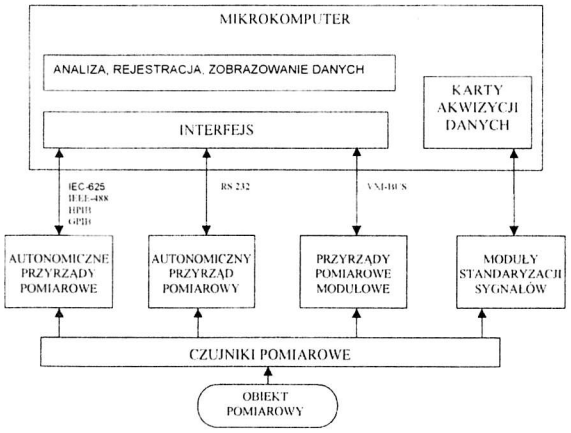
1. Wprowadzenie

Współczesny proces pomiarowy wykonywany jest najczęściej przy użyciu wspomagania komputerowego. Dotyczy to zarówno eksperymentów wykonywanych w pracowniach naukowych jak i laboratoriach uczelnianych. Podczas eksperymentu komputer może pełnić funkcję urządzenia do akwizycji danych pomiarowych lub sterować aparaturą pomiarową. Te dwa procesy odbywają się w czasie rzeczywistym, stąd wynikają wymagania pod względem prędkości działania komputera i wykorzystywanego oprogramowania. Aparatura pomiarowa może znajdować się w pobliżu komputera sterującego eksperymentem lub w dużej odległości od niego. Istnieje więc potrzeba transmisji danych, obróbki oraz prezentacji wyników. Umożliwiają to obecnie komputerowe systemy pomiarowe, wykorzystujące inteligentne czujniki i przetworniki pomiarowe oraz inteligentne układy kondycjonowania sygnałów.
Zastosowanie mikroprocesorów dało początek nowych inteligentnych technik pomiarowych. Stosowane są tu przyrządy powszechnie zwane inteligentnymi, odróżniające się od poprzednich generacji następującymi nowymi możliwościami [3,7]:

- realizowaniem części procedur pomiarowych w postaci cyfrowej według ściśle określonego algorytmu, przez co oprogramowanie staje się integralną częścią przyrządu i decyduje o jego właściwościach metrologicznych,
- realizowaniem wielu różnych algorytmów przetwarzania bez konieczności zmiany struktury sprzętowej przyrządu,
- pamięcią wyników i ich przetworzeń,
- komunikacją polegającą na wykorzystaniu specjalizowanych interfejsów pomiarowych do przesyłania informacji pomiarowej.

2. Współczesna technika pomiarowa
2.1. Struktura systemów pomiarowych

System pomiarowy stanowi zbiór środków technicznych przyporządkowanych wspólnemu celowi i ogólnemu algorytmowi działania. Przeznaczony jest on do automatycznego pozyskania informacji o obiekcie, w celu przekształcenia pomiaru i przedstawienia go w formie dopasowanej do wykorzystania przez człowieka oraz do wprowadzenia go do automatycznego urządzenia sterującego. Ogólny schemat komputerowego systemu pomiarowego przedstawiono na rys.1



Rys 1. Ogólny schemat komputerowego systemu pomiarowego

2.2. Układy akwizycji sygnałów pomiarowych

Głównym elementem układu akwizycji sygnałów pomiarowych jest przetwornik analogowo-cyfrowy. Zachodzi w nim konwersja sygnału analogowego na kod cyfrowy. W zależności od wymagań dotyczących rozdzielczości, dokładności i szybkości stosuje się różne metody przetwarzania analogowo-cyfrowego, np. z bezpośrednim kodowaniem, kompensacyjne (duża szybkość) lub integracyjne (wolniejsze, ale większa rozdzielczość i odporność na zakłócenia o częstotliwości technicznej, a tym samym i większa dokładność).

Wybór konfiguracji układu akwizycji sygnałów pomiarowych uzależniony jest od wymagań stawianych temu układowi. Stosowane są konfiguracje gdzie występuje sekwencyjne zbieranie sygnałów (z rozdziałem czasowym) a więc nie mogą być one stosowane tam, gdzie wymagane jest jednoczesne zbieranie sygnałów z kilku kanałów. W innej konfiguracji każdy kanał może posiadać własny układ formujący; taka konfiguracja może być stosowana przy różnych postaciach sygnałów wejściowych w różnych kanałach. W jeszcze innej konfiguracji może być wykorzystywany cyfrowy przełącznik kanałów, dzięki czemu występują mniejsze błędy niż w przypadku zastosowania przełącznika analogowego. Wiąże się to jednak z koniecznością zastosowania własnego przetwornika analogowo-cyfrowego w każdym kanale. Układy akwizycji sygnałów pomiarowych wykonywane są często w postaci modułów (kart pomiarowych), które można umieścić bezpośrednio w komputerze. Karty takie zwykle wyposażone są dodatkowo w przetworniki cyfrowo-analogowe (umożliwiające np. rekonstrukcję mierzonego sygnału lub generację wymuszeń), wejścia i wyjścia cyfrowe oraz układy czasowo-częstotliwościowe. Ważnym parametrem karty pomiarowej jest częstotliwość próbkowania wejścia analogowego (ang. sampling rate). Do pomiaru sygnału o dużej częstotliwości wykorzystuje się kartę pomiarową o dużej maksymalnej częstotliwości próbkowania. Częstotliwość próbkowania określa, ile próbek jest pobieranych w jednostce czasu. Podawana przez producentów maksymalna częstotliwość próbkowania odnosi się do jednego kanału. Wykonując pomiar w kilku kanałach, otrzymamy maksymalną częstotliwość próbkowania proporcjonalnie mniejszą. Przykładowo dla karty o maksymalnej częstotliwości próbkowania 100 kHz, przy wykorzystaniu czterech kanałów częstotliwość ta zmniejsza się do 25 kHz. Ważnym zadaniem układów akwizycji sygnałów pomiarowych jest kondycjonowanie sygnałów. Sygnały pochodzące z czujników pomiarowych muszą być przetwarzane na postać akceptowalną przez moduły DAQ (Data Acquisition – Akwizycji Danych).

2.3. Układy kondycjonowania sygnałów pomiarowych

Parametry mierzone w klasycznych czujnikach, niosące informację pomiarową, mają charakter analogowy. Zanim zostaną one przetworzone w sygnały napięciowe lub prądowe i następnie na postać cyfrową, muszą zostać odpowiednio przygotowane. Zadanie to spełniają układy kondycjonowania sygnałów zwane również kondycjonerami. Do ich roli należy między innymi: wytworzenie odpowiedniego sygnału wyjściowego, niedopuszczenie do przesterowania obwodów wejściowych układów elektronicznych - poprzez dopasowanie poziomów sygnału wejściowego, zabezpieczenie przed pojawieniem się nagłych skoków amplitudy, których czas narastania byłby większy niż dopuszczalny, ograniczenie pasma częstotliwościowego sygnału, usunięcie zakłóceń, itd. Kolejną funkcją układów kondycjonowania sygnałów jest zapewnienie izolacji galwanicznej. Oznacza to, że pomiędzy obwodem pomiarowym a obwodem wejściowym nie ma bezpośredniego połączenia elektrycznego. Najczęściej stosowaną operacją kondycjonowania jest wzmocnienie sygnału.

2.3.1. Funkcje przetwarzania

Poszczególne funkcje przetwarzania układów kondycjonowania to:

- Przetwarzanie skali sygnału, nazywane niekiedy też przetwarzaniem wartości sygnału, polega na proporcjonalnym zwiększaniu (wzmacnianiu) lub zmniejszaniu (tłumieniu) sygnału pomiarowego. Zachowany jest przy tym rodzaj energii i kształt sygnału. Zwiększenie skali należy stosować wszędzie tam, gdzie sygnał z przetwornika będzie tłumiony przy przesyłaniu go linią transmisyjną, a także tam, gdzie sygnał jest zbyt słaby w stosunku do powstającego szumu w torze pomiarowym.
- Przetwarzanie natury sygnału, zwane również przetwarzaniem wielkości, polega na przetwarzaniu sygnału wyjściowego przetwornika na sygnał o innej naturze energetycznej. Wykorzystuje się go wówczas, gdy na wyjściu przetwornika występuje sygnał niekompatybilny z sygnałem wejściowym następnego stopnia układu pomiarowego, np. sygnał napięciowy na prądowy, optyczny na elektroniczny, itp.
- Przetwarzanie kształtu, nazywane jest także przetwarzaniem przebiegu czasowego. Taki rodzaj kondycjonowania polega na celowej zmianie kształtu przebiegu czasowego sygnału. Uzyskać to można np. zmieniając rozkład widma sygnału.

Przetwarzanie skali, natury i kształtu sygnału, może być wykonywane w różnych miejscach toru pomiarowego. Funkcje te mogą być też kombinowane. Ważnym wymaganiem, które musi spełniać układ kondycjonujący jest to, aby informacja pomiarowa była wiernie zachowana przy przekazywaniu między poszczególnymi stopniami toru pomiarowego. Przyczyną stosowania izolacji galwanicznej jest zabezpieczenie przed błędami pomiaru lub uszkodzeniami sprzętu w przypadku, gdy masa przetwornika pomiarowego i układu akwizycji sygnału pomiarowego posiadają różny potencjał lub nastąpi doziemienie w różnych punktach układu.

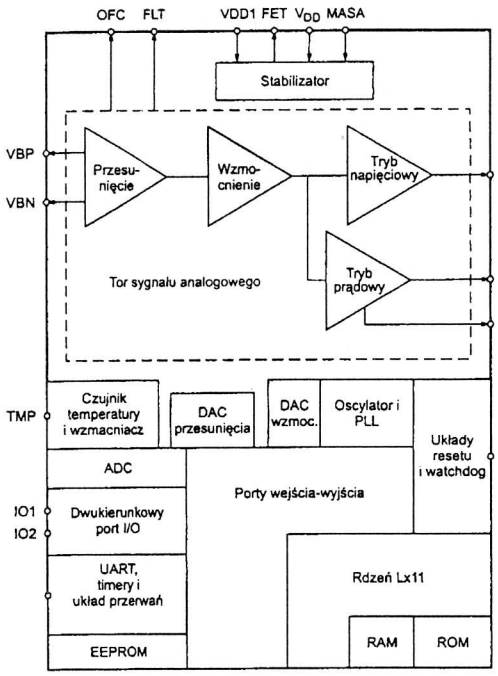
- Inną funkcją przetwarzania układów kondycjonowania sygnałów jest generacja sygnałów wymu-

szających. W przypadku pomiaru temperatury przy użyciu czujników termorezystancyjnych lub termistorowych wykorzystywane jest np. źródło prądowe. Pomiar polega wówczas na wyznaczeniu zmian spadku napięcia, jaki wywołuje przepływ prądu przez czujnik. W przypadku pomiaru naprężeń za pomocą pasków tensometrycznych małe zmiany rezystancji mogą być zmierzone w układzie wychyłowego mostka Wheatstone'a. Mostek taki jest zasilany stałym napięciem lub prądem, wytworzonym również w układzie kondycjonowania.

- Inną często stosowaną funkcją przetwarzania sygnału jest linearyzacja charakterystyki. Niektóre przetworniki, np. czujniki termoelektryczne do pomiaru temperatury, mają nieliniowy przebieg sygnału wyjściowego w funkcji mierzonej wielkości. Linearyzacja tej charakterystyki może być zrealizowana w układzie kondycjonowania.

2.3.2. Inteligentne kondycjonery

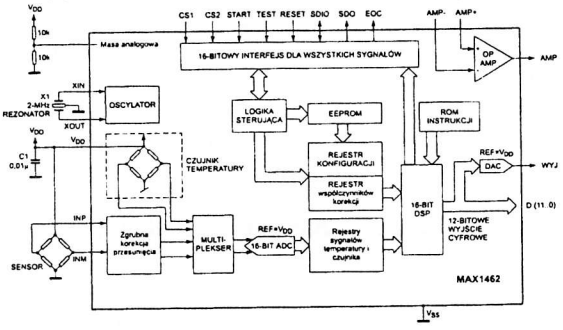
Rys.2 przedstawia schemat blokowy układu MLX90308 i MLX90314 firmy Melexis. Kondycjonery te zawierają mikrosterowniki do kalibracji i linearyzacji czujnika. Są one zoptymalizowane i wykorzystywane do przetworników ciśnienia i nadają się do mostkowych i różnicowych obwodów czujnikowych. Układy te zawierają specjalizowany mikrosterownik z 64 bajtami RAM (Random Access Memory – pamięć o dostępie bezpośrednim) i 4 kilobajtami ROM (Read Only Memory - pamięć tylko do odczytu), z czego 3kB są dostępne dla oprogramowania sprzętowego aplikacji użytkownika, a 1kB jest przeznaczony do testowania. Układy MLX90308 i MLX90314 różnią się tylko wielkością wzmocnienia sygnału analogowego, które wynosi odpowiednio 20 i 80. Oba układy mogą pracować w temperaturach zakresu motoryzacyjnego od - 40°C do +140°C. Są one przeznaczone do kondycjonowania sygnałów czujników mostkowych i symetrycznych, w tym termistorów, czujników naprężeń, przyspieszeniomierzy i innych. Kondycjonowanie obejmuje dobieranie wzmocnienia, kompensację przesunięć i wpływu temperatury oraz korekcję liniowości. Parametry kompensacji są przechowywane w 48-bajtowej pamięci EEPROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory - pamięć tylko do odczytu kasowana impulsami elektrycznymi).Do programowania kondycjonerów używa się komputera i odpowiedniego oprogramowania.



Rys. 2. Schemat blokowy układu inteligentnego kondycjonera sygnałów firmy Melexis MLX90308.

2.3.3. Uniwersalny inteligentny kondycjoner

Układ MAX1462 firmy Maxim umożliwia rzeczywiście uniwersalne kondycjonowanie dla czujników mostkowych (rys. 3). Zawiera on PGA (Programmable Logic Devices – układ programowany logicznie) oraz 16-bitowy ADC (Analog to Digital Converter - przetwornik analogowo-cyfrowy) umożliwiające dokonywanie poprawek cyfrowych w określonym zakresie temperatury. Współczynniki kalibracyjne i kompensacyjne są przechowywane w 128-bitowej EEPROM. Kondycjonowany sygnał wyjściowy 12-bitowego DAC (Digital to Analog Converter – przetwornik cyfrowo analogowy) jest proporcjonalny do napięcia zasilania. Do głównych cech MAX 1462 zaliczyć trzeba analogowe wejście wraz z PGA i zgrubną korekcją przesunięcia oraz interfejs testowania systemu. Interfejs ten pozwala wpisać współczynniki kalibracyjne do rejestrów DSP (Digital Signal Processors – cyfrowy procesor
sygnału) i EEPROM. Przesunięcie i czułość doprowadzonego do układu sygnału czujnika zostają zgrubnie skorygowane.



Rys.3. Uniwersalny inteligentny kondycjoner MAX 1462 firmy Maxim

Dla zoptymalizowania zakresu dynamicznego ADC, 5 bitów w rejestrze konfiguracji służy do dobrania wzmocnienia i przesunięcia PGA. Wewnętrznemu czujnikowi temperatury jest przyporządkowany 3-bitowy DAC, sprowadzający temperaturę do zakresu działania ADC. Rejestr tylko do odczytu w DSP przechowuje temperaturę w formie cyfrowej. Do obliczania w bloku DSP skorygowanej i skompensowanej informacji wyjściowej są wykorzystywane cyfrowe dane czujnika, dane temperaturowe i współczynniki korekcyjne.

3. Inteligentna aparatura pomiarowa

Wprowadzenie mikroprocesora nie nadaje przyrządowi automatycznie cech przyrządu inteligentnego. Jako przyrząd inteligentny uznaje się taki, który wykorzystuje w określony sposób informację a priori (zawartą w pamięci przyrządu) i informację bieżącą (wyniki pomiarów). Według sposobu wykorzystywania dostępnej informacji można wyróżnić pięć następujących poziomów inteligencji przyrządu [3]:

- *Poziom zerowy.* Jednofunkcyjne przyrządy, w których możliwości mikroprocesora służą do realizacji w cyfrowej formie tylko jednego algorytmu o dowolnej złożoności.
- *Poziom pierwszy.* Wielofunkcyjne przyrządy, mierzące pewien zbiór wielkości, w którym dla każdej z wielkości istnieje osobny program. W pamięci przyrządu znajdują się dane, niezbędne do realizacji poszczególnych procedur a także program wyboru algorytmu dla różnych funkcji.
- *Poziom drugi.* Przyrządy adaptacyjne, w których na podstawie informacji o warunkach pomiaru, właściwościach obiektu, wymaganiach i ograniczeniach, następuje wybór algorytmu zapewniającego przeprowadzenie pomiaru z możliwie największą dokładnością. W pamięci znajduje się oprogramowanie pewnego zestawu algorytmów oraz program wyboru algorytmu, jak również parametrów, z jakimi jest on wykonywany. Wyboru dokonuje się stosownie do realizowanej funkcji i zgromadzonej wiedzy o obiekcie oraz informacji o warunkach pomiaru.
- *Poziom trzeci.* Przyrządy iteracyjno - adaptacyjne, w których na podstawie informacji o warunkach pomiaru, właściwościach obiektu, wymaganiach i ograniczeniach, wybiera się algorytm iteracyjny dla każdego pojedynczego pomiaru z osobna. Algorytmem iteracyjnym nazywa się pomiar realizowany cyklicznie, w którym dla każdego cyklu wprowadza się parametry na podstawie wyników uzyskanych w poprzednim cyklu oraz informacji o zmieniających się warunkach pomiaru.
- *Poziom czwarty.* Przyrządy samouczące i samoorganizujące się. Przy takim poziomie inteligencji zarówno oprogramowanie, jak i struktura przyrządu dopasowują się samoczynnie do konkretnego zadania w określonych warunkach. Charakterystyczną cechą tych przyrządów jest to, że zestaw algorytmów nie jest zamknięty, lecz rozszerza się w miarę „uczenia się przyrządu". Właściwości takie należy traktować jako potencjalne możliwości przyrządów pomiarowych, realizowanych po upowszechnieniu metod sztucznej inteligencji.

Rozwój sposobów komunikacji sygnałów pozwala na włączenie pojedynczego przyrządu do systemu pomiarowego o praktycznie nieograniczonym zasięgu terytorialnym. Zapewnia to dużą efektywność zbierania danych, analizę wyników według określonych kryteriów, adresowanie wysyłanej informacji w zależności od wyników pomiarów itp. Systemy pomiarowe umożliwiają też wykonywanie pomiarów w miejscach niedostępnych dla człowieka. Toteż autonomiczna inteligentna aparatura pomiarowa oraz aparatura pracująca w systemie pomiarowym, tworzyć będą inteligentną technikę pomiarową. Można więc oczekiwać ciągłego udoskonalania i rozszerzania się możliwości inteligentnych technik pomiarowych. Na świecie obserwuje się ciągły rozwój technologii wytwarzania czujników pomiarowych i elementów elektronicznych pomimo, że możliwości współczesnych układów mikrokomputerowych znacznie przewyższają potrzeby konstruktorów aparatury pomiarowej. Powstają też coraz bardziej wyrafinowane oprogramowania, wytyczając nowe kierunki rozwoju tych technik. W przyszłości przewiduje się dołączenie technik wykorzystujących sieci neuronowe i systemy ekspertowe, a więc z poziomów trzeciego i czwartego. Powstają już pierwsze przesłanki stosowania takich technik [7]. Przyjęto następującą dewizę: dobre właściwości metrologiczne w inteligentnej technice pomiarowej można uzyskać przez właściwy dobór elementów (sprzęt) i algorytmów przetwarzania (oprogramowanie).

4. Inteligentne czujniki pomiarowe

Zapotrzebowanie na inteligentne czujniki pojawiło się w przemyśle, w zastosowaniach wymagających zdalnej obsługi (praca w miejscach niebezpiecznych lub niedostępnych), częstej zmiany zakresów pomiarowych (produkcja seryjna), szybkiej diagnostyki i napraw itp. Wprowadzając czujniki nazwane w języku angielskim „inteligent" (inteligentne), kierowano się bilansem korzyści. Optymalny poziom sprytu lub inteligencji czujników to taki, który można uzyskać bez wzrostu całkowitego kosztu systemu, w którym pracują [1,2,4,5,6,7, 8, 9]. W ostatnich latach opracowano wiele definicji czujników i przetworników, a szczególnie czujników inteligentnych; sporo z tych definicji jest sprzecznych ze sobą. Dla uniknięcia potencjalnych problemów wprowadzono podstawowe definicje zgodne z zaleceniami organizacji ISA (Industry Standard Architekture – architektura standardu przemysłowego) oraz IEEE (Institute of Electrical and Electronical Engineers – Instytut Inżynierów Elektryków i Elektroników - amerykańska instytucja normalizacyjna). Czujnik zdefiniowany jest przez ISA jako element wytwarzający użyteczny sygnał elektryczny w odpowiedzi na sygnał wielkości nieelektrycznej. Przetwornik jest określany jako element przekształcający energię jednego rodzaju na drugą, uwzględniający kalibrację w celu zmniejszenia błędów przetwarzania. Czujniki i inteligentne przetworniki są zdefinio-

wane przez IEEE jako urządzenia z wbudowaną inteligencją. Z reguły inteligencja ta stworzona jest przy wykorzystaniu stanu pewnej formy cyfrowego przetwarzania sygnału. Ze względu na fakt, że wbudowana inteligencja najczęściej zapewnia również kalibrację, pojęcie „inteligentnego czujnika" jest technicznie niepoprawne, choć szeroko rozpowszechnione, zwłaszcza w prasie technicznej i kręgach akademickich. Inteligencja przetwornika odnosi się co najmniej do jednego z dwóch podstawowych bloków funkcyjnych:

- inteligentne wytwarzanie sygnału wielkości nieelektrycznej (np. za pomocą przetwarzania sygnału skorelowanego, jak pomiar ciśnienia w oponach samochodu poprzez pomiar przyspieszenia pionowego systemu zawieszenia);
- inteligentne przetwarzanie sygnałów (np. algorytmiczna kompensacja wpływu temperatury).

Potencjalne usprawnienia oferowane użytkownikom przez inteligentne przetworniki, w porównaniu do rozwiązań klasycznych, można przedstawić następująco:

- możliwość jednoczesnej kalibracji i kompensacji wielu przetworników na linii produkcyjnej,
- zwiększona dokładność, teoretycznie ograniczona jedynie niestabilnością czujnika a nie jego nieliniowością (ciśnieniową lub temperaturową), jak to ma miejsce w przypadku klasycznych przetworników,
- zwiększona odporność na zakłócenia i możliwość komunikacji na dłuższy dystans,
- detekcja błędów i diagnostyka,
- zdolność podejmowania decyzji,
- możliwość lokalnego zbierania, przetwarzania i dystrybucji informacji,
- dwustronne komunikowanie się z innymi urządzeniami przy użyciu standardowych protokołów komunikacji (ang. protocol - zbiór reguł sterujących wymianą informacji pomiędzy dwoma lub wieloma niezależnymi urządzeniami lub procesami),
- rozwiązywanie konfliktów, np. pierwszeństwo dostępu do sieci komunikacyjnej,
- programowalna wiedza, np. o czasach oczekiwanych transmisji danych,
- samotestowanie lub samokalibracja,
- zdolność uczenia się, np. optymalizowanie zakresu pomiarowego,
- systemowa interoperacyjność na poziomie przetwornika.

Inteligencja przetworników jest rezultatem implementacji mikrokontrolera standardowego lub procesora dedykowanego. Współczesne czujniki określa się trzema przymiotnikami: inteligentny, zintegrowany i półprzewodnikowy.

Inteligentny - tzn. programowalny, działający autonomicznie, adaptacyjnie, z możliwością komunikacji z innymi urządzeniami. Jedną z najistotniejszych czynności w wytwarzaniu i użytkowaniu czujników jest ich kalibracja, która nadaje im wartość użytkową narzędzia pomiarowego. Podstawowe znaczenie ma więc zdolność inteligentnego czujnika do samokalibracji w aktualnych warunkach pomiaru.

Zintegrowany - bo zawiera jeden lub kilka czujników, a ponadto różne układy analogowe lub cyfrowe w tym mikroprocesor - całość w jednej strukturze scalonej.

Półprzewodnikowy - wykonywany najczęściej z krzemu, z wykorzystaniem aktualnie stosowanych technologii elektronicznych.

Bardzo szerokie perspektywy wykorzystania w czujnikach inteligentnych mają algorytmy wykorzystujące logikę rozmytą, algorytmy genetyczne i sztuczne sieci neuronowe. Szczególnie interesujące są te ostatnie, ze względu na specyficzną cechę, jaką jest zdolność do samoorganizacji i uczenia się. Czujnik może więc dopasować się nawet do takich warunków pracy, które nie były przewidziane przez konstruktora.

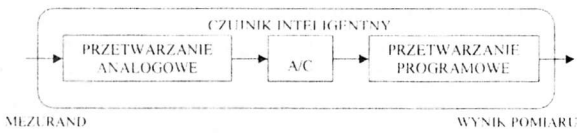
Nazwa "inteligentny czujnik " jest używana w stosunku do przyrządów pomiarowych, które informację o wielkości mierzonej przekazują w postaci cyfrowej i komunikują się z zewnętrznym systemem komputerowym w oparciu o standardowy protokół.

Funkcje czujnika podano poniżej:

- pomiar sygnału czujnika i przetworzenie go na postać cyfrową,
- linearyzacja charakterystyki,
- automatyczny dobór zakresu pomiarowego i czułości układu pomiarowego,
- temperaturowa korekcja charakterystyki,
- autokalibracja i autotestowanie,
- badanie poziomu ufności pomiarów,
- filtracja sygnałów,
- analiza statystyczna,
- korekcja odpowiedzi impulsowej czujnika,
- korekcja histerezy czujnika,
- realizacja wieloparametrowej metody pomiaru,
- współpraca z matrycą czujników (multipleksowanie),
- sterowanie siłownikami współpracującymi z czujnikami,
- badanie poziomu ufności pomiaru (redundancja, eliminacja czujników wadliwych).

Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje przetwarzania realizowane przez inteligentne czujniki: przetwarzanie analogowe, przetwarzanie analogowo – cyfrowe i przetwarzanie programowe. Na rys 4 pokazano ogólny schemat struktury inteligentnego czujnika.

A/C- przetwornik analogowo-cyfrowy



Rys. 4. Struktura wewnętrzna inteligentnego czujnika.

Uwaga: MEZURAND (ang. measurand) oznacza wielkość (niezależną od czasu i współrzędnych przestrzennych), funkcję lub funkcjonał.

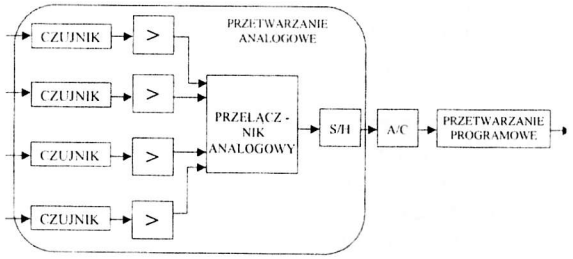
Inteligentne czujniki można klasyfikować według następujących kryteriów:

- liczba i rodzaj wielkości mierzonych,

- metody pomiaru,
- rodzaj i sposób przetwarzania analogowego,
- konstrukcja torów przetwarzania analogowego,
- sposób konwersji analogowo - cyfrowej,
- rodzaje zastosowanych algorytmów przetwarzania programowego.

Najczęściej występującym torem analogowym jest połączenie szeregowe przetworników pokazane na rys.5

S/H-próbkowanie z podtrzymaniem, A/C- przetwornik analogowo-cyfrowy, > wzmacniacze

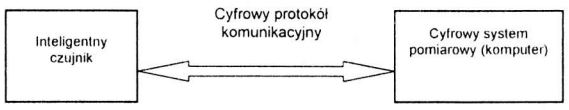


Rys. 5. Tory analogowe inteligentnego czujnika

Konwersja analogowo - cyfrowa wykonywana jest dwoma metodami: pomiar wartości chwilowej napięcia wyjściowego toru analogowego i pomiar wartości uśrednionych za pewien okres czasu. Algorytmy przetwarzania programowego należą do jednej z dwóch grup: algorytmy podwyższające dokładność czujnika i algorytmy obliczania wyniku pomiaru. Do pierwszej grupy zalicza się sytuacje, w których drogą obliczeń koryguje się wyniki konwersji A/C, aby mieściły się w zadanym przedziale niepewności. Algorytmy te mają często formę adaptacyjną. Druga grupa algorytmów stosowana jest wtedy, gdy wynik konwersji A/C nie stanowi wskazania wartości mezurandu a konwerter A/C dostarcza wartości chwilowych, na podstawie których wyliczane są parametry sygnałów.

4.1. Struktura inteligentnego czujnika

Jedna z popularniejszych definicji czujnika inteligentnego (ang. inteligent sensor) brzmi [4,7]: „Czujnik inteligentny sam w sobie spełnia funkcje przetwarzania i kalibracji / automatycznej kompensacji, przy której wykrywa i eliminuje wartości nienormalne lub wyjątkowe. Zawiera on algorytm, który może być zmieniany, a także, w pewnym stopniu, funkcję pamięci. Może współpracować z innymi czujnikami, adaptuje się do zmian warunków otoczenia i ma funkcję rozróżnienia (rozeznania)".



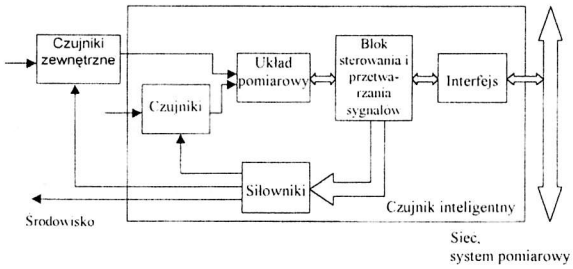
Rys. 6. Schemat podłączenia inteligentnego czujnika do systemu

W roku 1992 prof. Ryszard Jachowicz [4] jako pierwszy zaproponował następującą definicję inteligentnego czujnika:

„Inteligentny czujnik jest elementem pomiarowym przekazującym informację o mierzonej wielkości przetworzonej na postać cyfrową, który komunikuje się z zewnętrznym cyfrowym systemem pomiarowym na podstawie standardowego protokołu komunikacji z użyciem standardowego interfejsu"(rys.6).

Strukturę wewnętrzną inteligentnego czujnika(rys.7), tworzą następujące człony funkcjonalne [4,6]:

- pojedynczy czujnik fizyczny (bądź zespół różnych czujników lub matryca takich samych czujników), wbudowany w strukturę czujnika lub podłączony z zewnątrz, wraz z układem kondycjonowania sygnału,
- układ pomiarowy (np. przetwornik A/C),
- blok cyfrowego przetwarzania sygnałów i sterowania (musi mieć możliwość zbierania danych z wielu czujników oraz sterowania siłownikami współpracującymi z czujnikiem),
- blok interfejsu - procesora sieci (interfejs umożliwia podłączenie czujnika do systemu pomiarowego i przepływ informacji; funkcje komunikacyjne interfejsu muszą być zgodne z protokołem przyjętym w systemie).



Rys. 7. Typowa struktura wewnętrzna inteligentnego czujnika

Urządzenie o tak zdefiniowanych cechach jest, ściśle mówiąc, inteligentnym przetwornikiem. W języku polskim brak jest jednoznacznej, spójnej terminologii uwzględniającej różne atrybuty i cechy czujników, a określenie „czujnik inteligentny" najczęściej obejmuje zarówno inteligentny czujnik (ang. inteligent sensor), jak również inteligentny przetwornik (inteligent transmiter). Inteligentny przetwornik to taki, w którym funkcje systemu mikroprocesorowego służą:

- dostarczeniu pierwotnego sygnału pomiarowego,
- zapamiętaniu informacji dotyczących samego przetwornika, danych o jego zastosowaniu i usytuowaniu oraz,
- zarządzaniu systemem komunikacji dwukierunkowej realizowanej w tym samym obwodzie co sygnał pomiarowy - komunikacji pomiędzy przetwornikiem i jednostką interfejsową, dołączoną do dowolnego punktu dostępu do pętli pomiarowej lub do centrali.

4.2. Inteligencja czujników

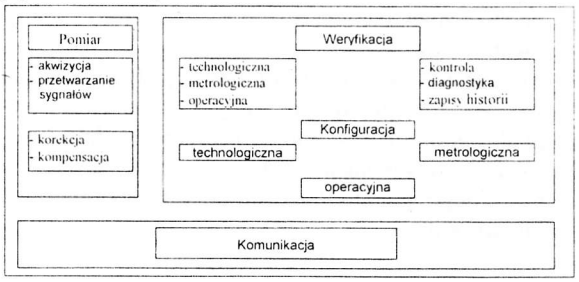
Inteligencja czujników jest wynikiem implementacji mikrokontrolera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie. Dzięki temu można programowo modyfikować funkcje, właściwości czujnika i uzyskiwać do niego zdalny dostęp [9]:

inteligencja czujnika = mikroprocesor + program
funkcja czujnika = czujnik + program

Potencjalne usprawnienia oferowane użytkownikom przez inteligentne czujniki, w porównaniu do rozwiązań klasycznych, to następujące funkcje:

- kształtowanie przebiegu i linearyzacja jego charakterystyki,
- automatyczne sterowanie procesem porównania ze wzorcem,
- automatyczne ustawianie zakresu pomiarowego,
- rozpoznanie i usuwanie błędów chwilowych,
- rejestracja danych,
- kompresja danych w celu zaoszczędzenia pamięci (bez utraty informacji),
- wstępne statystyczne opracowanie danych (określanie wartości średnich wielkości wejściowych, wariancji, itd.),
- sterowanie procesami wizualnymi (organizacja pamięci, generowanie dodatkowych opisów),
- sterowanie pracą wydzielonych bloków, np. przetwornikiem A/C,
- autodiagnoza poszczególnych bloków przyrządu (organizacja testów, wizualizacja niesprawności itd.),
- sterowanie pracą interfejsu, zgodnie z określonym protokołem.

Wymienione funkcje inteligentnego czujnika można uzyskać stosując architekturę przedstawioną na rys.8. Realizację wyżej wymienionych zadań umożliwia ogromny postęp w budowie układów scalonych dużej skali integracji. Obniża to koszty wytwarzania inteligentnego czujnika i jednocześnie podwyższa jego niezawodność. Rośnie też często jego funkcjonalność, dokładność pomiarowa, szerokość zakresu pomiarowego, a przede wszystkim zakres aplikacji. Szczególnie dotyczy to układów specjalnych. W typowej strukturze inteligentnego czujnika można wyróżnić następujące bloki: czujnik lub zespół czujników, blok pomiarowy, blok sterowania i przetwarzania sygnału oraz blok interfejsu. Interfejs umożliwia podłączenie czujnika do systemu pomiarowego i nadzoruje przepływ informacji.



Rys.8. Uogólniona architektura inteligentnego czujnika

Funkcje komunikacyjne interfejsu muszą być zgodne ze standardem protokołu przyjętym w systemie. Sygnały wejściowe mogą być wprowadzone bezpośrednio do struktury lub przy użyciu toru pomiarowego jako układu jednowymiarowego.

Inteligentne czujniki posiadają możliwości korzystania z nabytej wiedzy. Zdobywają one wiedzę przez uczenie się i jest ona zapamiętywana w pamięci układu mikroprocesorowego. Formy zdobywania wiedzy to:

- bezpośrednie zapisywanie,
- uczenie się poprzez zapamiętywanie.

Mogą to być proste algorytmy działania, np.: mnożenie wielkości, linearyzacja charakterystyk, obsługa baz danych bez dokonywania ich przekształceń. Zdobywanie wiedzy może też być realizowane bezpośrednio, np.:

- na podstawie rozkazów - istnieją reguły tzw. „dołączenia wiedzy",
- przy wykorzystaniu analogii, polegające na tworzeniu struktur wiedzy pewnej dziedziny przez podobieństwo do struktury w innej dziedzinie,
- na podstawie przykładów, polegające na tworzeniu pojęć bazując na znanych przykładach,
- na podstawie obserwacji, polegające na uczeniu się przez eksperymentowanie pasywne i aktywne (działanie, rozwiązywanie problemu, pozyskiwanie reguł, tworzenie klasyfikacji, odkrywanie związków, generowanie teorii).

Uogólniając, inteligentny czujnik dysponuje bazą wiedzy, którą pozyskuje się w sposób wyżej opisany oraz strukturą, która tę wiedzę wykorzystuje.

4.3. Normalizacja czujników

Norma IEEE-1451 dotycząca czujników ma na celu ujednolicenie i uproszczenie sposobów włączania czujników i układów wykonawczych do już istniejących systemów kontrolno-pomiarowych.

Norma składa się z dwóch części IEEE-1451.1 i IEEE-1451.2, dotyczących softwaru i hardwaru:

- IEEE-1451.1 - cześć normalizująca podłączenie mikroprocesora sieciowego NCAP do sieci. Część ta dotyczy softwaru. Tworzy znormalizowane podłączenie przetwornika IEEE-1451.2 do sieci.
- IEEE-1451.2 - część normalizująca architekturę hardwaru przetwornika i jego połączenie z mikroprocesorem sieciowym NCAP.

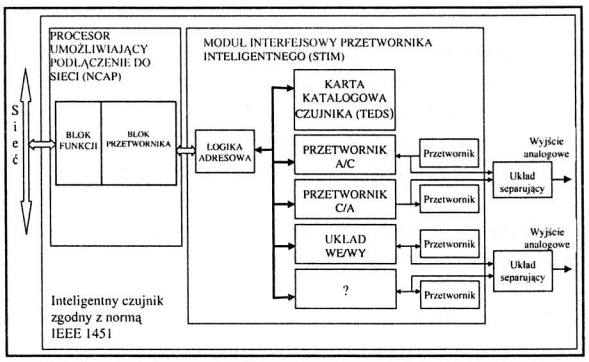
Norma ta opisuje między innymi dwa podstawowe moduły:

- NCAP - ang. Network Capable Application Processor - jest to procesor umożliwiający podłączenie do sieci realizacji określonej funkcji. Może to być mikroprocesor lub komputer.
- STIM - ang. Smart Transducer Interface Module — moduł interfejsowy (przyłączeniowy) przetwornika (czujnika) inteligentnego.

Na rys.9 przedstawiono strukturę inteligentnego czujnika najnowszej generacji, zgodną z normą IEEE-1451. Opracowanie tego układu wyprzedza znacznie zatwierdzenie normy. Warto nadmienić, że STIM umożliwia dołączenie aż 255 przetworników. Każdy z przetworników może mieć także wyjście analogowe.

Chociaż nie ma tego w tytule normy, przewiduje ona nie tylko zbieranie danych pomiarowych, ale także sterowanie organami wykonawczymi.
W normie wykorzystano dwie koncepcje, (rys.9):

- wprowadzenie elektronicznej karty katalogowej przetwornika TEDS (ang. Transducer Electronic Data Sheet), do hardwaru przetwornika. Każdy przetwornik powinien być zaopatrzony w wyjście cyfrowe połączone z małą pamięcią, w której wpisane są podstawowe informacje metrologiczne - aplikacyjne.
- uniezależnienie konstrukcji przetwornika od hardwaru sieciowego.



Rys 9. Inteligentny czujnik według IEEE 1451.2.

Czujnik wg. rys.9 zawiera: NCAP - sprzęg między czujnikiem a siecią, moduł interfejsowy inteligentnego czujnika STIM, który może zawierać wiele różnych czujników i musi posiadać pamięć nieulotną TEDS, zawierającą szczegółowy zapis struktury STIM.
Zaproponowano system modułów programowych (ang. drivers), specyficznych dla danej sieci. Taka architektura przetwornika uniwersalnego umożliwia łatwe przekształcenie istniejących analogowych czujników i układów wykonawczych w przetworniki odpowiadające normie IEEE-1451 przez dodanie przetwornika analogowo - cyfrowego oraz pamięci TEDS. Oprogramowanie sieciowe dla tych przetworników będzie opracowywał producent mikroprocesorów NCAP. Przetwornik zgodny z normą IEEE-1451.2 łączy się za pomocą interfejsu z jednym tylko softwarowym modelem znormalizowanej sieci, jaki reprezentuje blok przetwornika. Blok funkcji przekształca znormalizowane informacje na sygnały charakterystyczne dla danej sieci.
W normie IEEE-1451.2 wyszczególniono elementy hardwarowe przetwornika potrzebne do przekształcenia go w przetwornik uniwersalny, tj. dodanie:

- małej pamięci (ok. 500 bitów/kanał). Pamięć ta musi zawierać znormalizowane informacje metrologiczno-administracyjne o czujniku, umieszczone w kartach katalogowych.
- interfejsu cyfrowego do komunikacji z mikroprocesorem NCAP.

Kartę katalogową TEDS podzielono na dwie części:

- ogólną kartę katalogową TEDS, zawierającą informacje o przetworniku, wspólną dla wszystkich kanałów, np. nazwę producenta.
- kanałową kartę katalogową TEDS, zawierającą informację o charakterystyce pojedynczego kanału reprezentującego jeden czujnik lub układ wykonawczy.

Celem normy IEEE-1451.1 jest znormalizowanie oprogramowania przetwornika pracującego w sieci.
Mikroprocesor sieciowy NCAP zawiera dwie grupy programów funkcjonalnych:

- blok przetwornika,
- model obiektowy przetwornika.

Blok przetwornika normalizuje system komunikacji pomiędzy przetwornikiem i mikroprocesorem NCAP.
Model obiektowy przetwornika określa sposób przesyłania danych z bloku przetwornika do innych bloków oprogramowania mikroprocesora NCAP oraz przystosowuje je do wymagań programowych sieci zewnętrznej. Norma IEEE-1451 jest więc swojego rodzaju „interfejsem", ukierunkowanym na wykorzystanie istniejącego hardwaru sieci kontrolno-pomiarowych i ich oprogramowania. Wymaga to niewielkich zmian w architekturze istniejących wyrobów. Ma być również interfejsem komplementarnym, a nie konkurencyjnym do istniejących już interfejsów sieciowych..

5. Systemy pomiarowe z inteligentnymi czujnikami

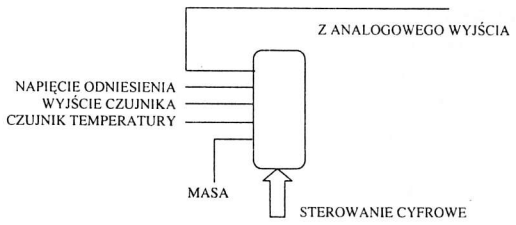
Inteligentne czujniki stały się osiągalne dzięki gwałtownemu postępowi w mikroelektronice, który spowodował wzrost popytu na nie oraz stworzył możliwości wykonawcze. Obecnie obserwuje się wzrost wymagań na pomiary szerokiego zakresu wielkości fizycznych i chemicznych, przy jednoczesnym rozbudowywaniu się przemysłowych systemów pomiarowych i pojawianiu coraz większych problemów z komunikacją.

Komunikacja

Skuteczna komunikacja jest jedną z podstawowych zalet mikroelektroniki cyfrowej. Szeregowe sygnały binarne są bardziej odporne na zakłócenia niż tradycyjne formy analogowe, co nabiera znaczenia przy wzroście zakłóceń elektromagnetycznych znajdujących się w środowisku. Co więcej, koncepcja adresowania, zezwalająca na użycie topologii szyny zamiast tradycyjnej gwiazdy, wprowadza istotne oszczędności w głównej pozycji kosztów - okablowaniu. Ten sposób połączeń nie tylko pozwala centralnemu procesorowi na badanie poszczególnych czujników, lecz umożliwia również wymianę informacji pomiędzy czujnikami.
Kompensacja
Użyteczność tradycyjnych czujników jest głównie ograniczona przez defekty organicznie z nimi związane. Najważniejszymi z nich są:

- odpowiedź czasowa lub częstotliwościowa,
- nieliniowość,
- szum,
- dryf parametrów,
- czułość skrośna.

Dotychczas istniały dwa sposoby rozwiązywania tych problemów. Pierwszy - projektowanie czujnika tak, aby je zminimalizować. Sposób ten można określić jako kompensację struktury. Drugi - korekcja parametrów struktury tak, aby optymalizować wykonanie, co można określić jako kompensację indywidualną. To postępowanie zmierzało do znacznego zwiększenia kosztu czujnika, jako że wymagało znacznego nakładu wysokokwalifikowanej pracy ludzkiej. Ponadto te metody miały swoje ograniczenia i chociaż umożliwiały skonstruowanie czujnika, to odrzucały wiele potencjalnie użytecznych mechanizmów fizycznych z powodu organicznych defektów czujników tradycyjnych. Metody cyfrowe natychmiast tworzą kilka prostych rozwiązań, które usuwają problemy kompensacyjne. Na przykład tabele korekcyjne w sposób istotny redukują znaczenie nieliniowości, która czyniła bezużytecznymi wiele potencjalnych mechanizmów czujnikowych. Problem czułości skrośnej był niezwykle trudny do rozwiązania, jednak ostatnio nastąpiły duże zmiany. Dla wielu tradycyjnych, wyrafinowanych metod jest bardzo trudne wytworzenie czujnika, którego sygnał wyjściowy jest zależny jedynie od mierzonej wielkości fizycznej, biorąc pod uwagę częste występowanie szkodliwej czułości na temperaturę. Inteligentny czujnik mierzy wartość zmiennej zakłócającej i następnie na drodze obliczeń koryguje jej wpływ. Ta metoda może być nazwana kompensacją z monitorowaniem i jest charakterystyczna dla inteligentnych czujników, które zazwyczaj mają wewnętrzny czujnik do monitorowania temperatury. Istnieją przypadki, gdzie problem czułości skrośnej jest tak znaczny, że aż trudny do określenia. Typowym przykładem są czujniki gazu i wilgotności. Dla nich pojęcie „czujnik w czujniku" jest zastępowane użyciem matrycy czujników.



Rys. 10. Wejściowy przełącznik inteligentnego czujnika

Autotest i autokalibracja

Jednym z poważniejszych zarzutów stawianych inteligentnym czujnikom w momencie tworzenia pierwszych konstrukcji było to, że bardziej skomplikowane systemy są jednocześnie bardziej zawodne. Faktem jest, że technologia odkryła odwrotny dowód tej reguły. Istota tego faktu wynika z przynależnej inteligentnym czujnikom możliwości autotestowania. Może ona być przedstawiona jako prosty podsystem inteligentnego czujnika, którego wejściowy sygnał jest wybiórczo przełączany za pomocą sterowania cyfrowego (rys10). Podsystem jest zdolny do sprawdzania wzmocnienia i przesunięcia zera części analogowej i magazynuje te wartości po konwersji A/C dla dalszej cyfrowej korekcji. Realizuje się to dzięki przełączaniu wejścia układu do napięcia odniesienia, a następnie do masy. Dalej na drodze przełączania do analogowego wyjścia systemu jest możliwa korekcja liniowości przez generowanie liniowego zbocza i obserwowanie na wyjściu, czy jest ono nadal liniowe. Również w czasie normalnych operacji następuje przełączanie do wewnętrznego czujnika temperatury, co umożliwia eliminację szkodliwej czułości na temperaturę. Ważna jest także autokalibracja, np. kompensacji wpływu temperatury. W tradycyjnych metodach urządzenie powinno być włożone do komory z dokładnie kontrolowaną temperaturą i przygotowywać szczegółową informację o błędzie dla każdej nastawy temperatury komory tak, aby następnie umożliwić przeprowadzenie korekcji.

W inteligentnych czujnikach nie jest wymagane dokładne mierzenie temperatury przy autokalibracji. Niezbędne jest jedynie utrzymywanie urządzenia w jego zakresie temperatur pracy i zapewnienie równoważenia w głównych punktach. Następnie można wypełnić tabelę poprawek zawartą wewnątrz czujnika i później stosować poprawki korekcyjne. Okresowa autokalibracja jest również prosta.

6. Inteligentne czujniki we współczesnej aparaturze pomiarowej

Inteligentne czujnik (ang. smart sensor) jest elementem słabo zdefiniowanym, do niedawna określanym jako taki. który może „coś więcej niż zwykły czujnik". Pomijając historię (krótką, bo zaczynającą się od około 1985 r.) rozwoju smart sensor trzeba powiedzieć, że dzisiaj jego funkcję i konstrukcję określają zarówno obecne możliwości jak i wymagania techniczne. Możliwości techniczne wytyczają opanowane obecnie metody projektowania i wykonania specjalizowanych układów o dużej skali integracji typu ASIC. Wymagania techniczne są związane z powszechnością komputerowych systemów pomiarowych. Inteligentny czujnik jest elementem pomiarowym, przekazującym informację o mierzonej wielkości w postaci cyfrowej, który komunikuje się z zewnętrznym cyfrowym systemem pomiarowym (komputerem) w oparciu o standardowy protokół komunikacji i z użyciem standardowego interfejsu. Inteligentnym czujnikom stawia się na ogół duże wymagania funkcjonalne. Wynika to z faktu, że po przekroczeniu pewnych „progowych wymagań" dalsze ich zwiększenie nie musi się wiązać z jakimikolwiek zmianami strukturalnymi inteligentnego czujnika. W takim przypadku kolejne zadania są kolejnym rozkazem uruchomienia specjalnej procedury pomiarowej lub procedury analizy sygnału.

Technologia półprzewodnikowa i cienkowarstwowa stosowana w produkcji czujników skłania do wykonywania matryc. Dlatego też blok „czujnik" należy również rozumieć jako zespół różnych czujników lub matryce tych samych czujników. W celu uzyskania dobrych parametrów metrologicznych czasami czujnikom należy stworzyć odpowiednie warunki pomiarowe przy użyciu siłowników sterowanych z systemu cyfrowego przetwarzania sygnałów.

6.1. Typy inteligentnych czujników

Wytworzenie inteligentnych czujników zintegrowanych w jednej obudowie nie musi się wiązać z realizacją całego schematu z rys. 7 w jednej strukturze krzemowej. Obecnie wydaje się bardziej celowe wykonywanie „części inteligentnej" na osobnych strukturach półprzewodnikowych i montażu ich w tej samej obudowie. Takie podejście do zagadnienia nakłania do opracowania kilku typów „części inteligentnej", pokrywającej różnorodne potrzeby w dziedzinie inteligentnych czujników.
Analiza typów powinna być przeprowadzona w trzech sferach (zgodnie z rys. 7):
- układów pomiarowych,
- bloku cyfrowego przetwarzania sygnałów i sterowania,
- bloku interfejsu.

6.2. Typy układów pomiarowych

W przypadku systemu pomiarowego inteligentnego czujnika należy w analizie, a później przy unifikacji konkretnych rozwiązań układowych, rozpatrywać następujące problemy:
- wytypować podstawowe wielkości elektryczne (wielkości wyjściowe czujników) i zaprojektować uniwersalne układy pomiarowe tych wielkości,
- ustalić rozmiar matrycy czujników (n = 1...., N) oraz podjąć decyzję co do sposobu multipleksowania: multiplekser pomiędzy układem pomiarowym a matrycą czujników, czy też tyle układów pomiarowych ile czujników, a multipleksowanie za układami pomiarowymi.
- ustalić rodzaje wzorców niezbędnych do autokalibracji i autotestowania inteligentnego czujnika.
- ustalić rodzaje siłowników i sposób ich sterowania (binarne czy ciągłe) oraz liczbę siłowników (jeden wspólny czy dla każdego czujnika oddzielny) i zaprojektować układ do sterowania siłownikiem.

Przy opracowywaniu typów układów pomiarowych należy brać pod uwagę następujące wyjściowe wielkości elektryczne: rezystancję (również mostki rezystancyjne), napięcie (również napięcia różnicowe), prąd, pojemność, indukcyjność i częstotliwość (również liczbę impulsów).

7. Inteligentne przetworniki pomiarowe

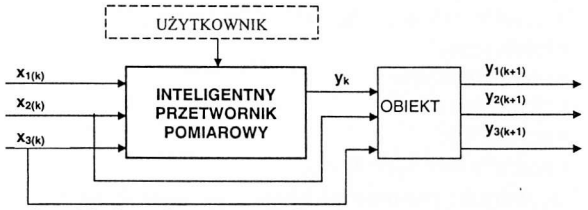
Podobnie jak inteligentne czujniki została określona klasa inteligentnych przetworników. Wyróżnikami klasy inteligentnych przetworników są:
- realizacja procedur pomiarowych w postaci algorytmów programowanych,
- struktura sprzętowa służąca do realizacji wielu algorytmów,
- komunikacja z otoczeniem odbywająca się przez standardowe interfejsy.

Inteligentne przetworniki mogą być przedstawione w postaci modelu hierarchicznego według następujących kryteriów:
- liczba wielkości mierzonych,
- liczba parametrów konstrukcyjnych,
- złożoność algorytmów.

Kryteria te pozwalają podzielić przetworniki, w sposób bardzo umowny, na następujące grupy:
- funkcyjne,
- kompensacyjne,
- ekspertowe,
- uczące się,
- nadmiarowe sprzętowo.

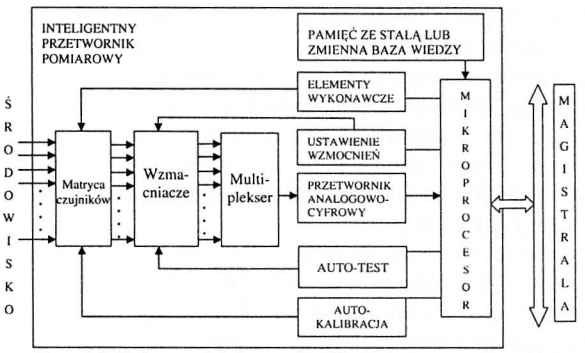
Przetworniki pomiarowe mogą być uznane za inteligentne, jeśli obok wszelkich cech przetworników pomiarowych spełniają postulat korzystania ze zdobywanej wiedzy. Zdobywanie wiedzy jest procesem uczenia. Sposoby uczenia i samouczenia są odrębnym zagadnieniem i można je w uproszczeniu podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Przetwornik nabywa wiedzę bezpośrednio przez zapamiętanie, gdy wiedza zapisywana jest przez projektantów. Pośrednie metody zdobywania wiedzy podzielono na kilka grup. Do pierwszej grupy zalicza się metody bazujące na regułach dołączania wiedzy. Struktura wiedzy nie jest precyzowana. Najczęściej są to gotowe algorytmy w formie gotowych programów. Innym sposobem jest wykorzystywanie analogii, gdy struktury wiedzy jednej dziedziny tworzone są przez podobieństwo do innej dziedziny. Zasada ta jest powszechnie stosowana przy modelowaniu i symulacji. Trzecią grupę stanowi metoda przekazywania wiedzy przez uczenie, polegająca na pokazywaniu prototypów, które pomagają przy tworzeniu pojęć. System uczący pokazuje prototypy i koryguje wyniki klasyfikacji. System uczący wyposażony jest w algorytm tworzenia klas w oparciu o prototypy i procedurę testowania poprawności. Najbardziej ogólnym sposobem zdobywania wiedzy jest obserwacja. System uczący się dysponuje obrazem otoczenia pochodzącym z czujników wejściowych. Pasywna obserwacja może być mało wystarczająca i dlatego inteligentny przetwornik może oddziaływać na otoczenie badając je. Rzeczywiste konstrukcje są daleko mniej skomplikowane. Wiedza zwykle jest bezpośrednio implementowana i dołączana do bazy wiedzy już istniejącej.
Nowe technologie wymagają opracowania przetworników dla wielkości poprzednio nie mierzonych, a do tego o bardzo małych wymiarach. Istnieje konieczność uzyskiwania wysokiej niezawodności i wysokiej klasy dokładności. Poprawę klasy uzyskuje się przez zmniejszenie wpływu różnych zakłóceń. Dla większości przypadków niezbędny jest równoczesny pomiar kilku wielkości wejściowych.
W ostatnich latach obserwuje się gwałtowny rozwój przetworników służących do pomiaru wielu parametrów. Pomiary takie wykonywane są dzięki zastosowaniu systemów o wielu wejściach i jednym lub wielu wyjściach typu MISO (ang. Multi Input Single Output) lub MIMO (ang. Multi Input Multi Output). W strukturze takiego systemu (przetwornika) umieszcza się jeden lub kilka mikroprocesorów i wtedy nosi on nazwę inteligentnego przetwornika [4,5].
W mikroprocesorze realizowane są algorytmy na podstawie informacji zebranych z zestawu czujników

x (w chwili czasowej k) i ewentualnie od użytkownika, co ilustruje rys. 11.



Rys.11. Sposób połączenia inteligentnego przetwornika pomiarowego z obiektem

Inteligentne przetworniki cechuje zespół zdolności, umożliwiający przetwornikowi korzystanie z nabytej wiedzy. Wiedzę zdobywa się przez uczenie się. Najprostszą formą zdobywania wiedzy jest bezpośrednie zapisywanie wiedzy, uczenie się przez zapamiętywanie. Wiedza zapisana jest przez projektantów. Mogą to być proste algorytmy działania, np. mnożenie wielkości, linearyzacja charakterystyk, obsługa baz danych bez dokonywania ich przekształceń. Inteligentny przetwornik może być realizowany z wykorzystaniem następujących typów integracji sprzętowej: modułowej, jednopłytowej, hybrydowej (cienko lub grubowarstwowej) i monolitycznej. Rozwój inteligentnych przetworników wynika przede wszystkim z ogromnego postępu w budowie układów scalonych. Dotyczy to szczególnie układów scalonych specjalizowanych, projektowanych do zadanych zastosowań (ang. ASIC). Budowę inteligentnego przetwornika, który może być wykonany techniką grubowarstwową, z wykorzystaniem układów typu ASIC, przedstawiono na rys.12 [8].

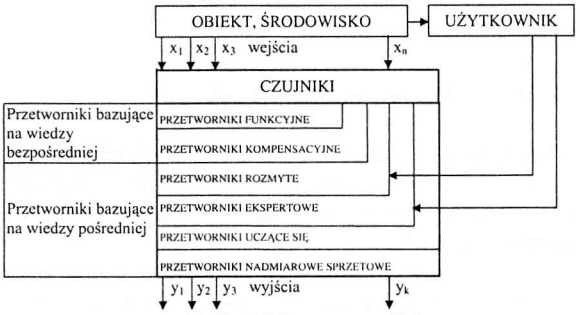


Rys. 12. Schemat blokowy inteligentnego przetwornika pomiarowego

Ponadto w literaturze można się spotkać z podziałem inteligentnego przetwornika na część, w której znajdują się czujniki oraz część, gdzie ma miejsce obróbka sygnałów, zawierającą multiplekser i procesor jednoukładowy. Należy tu podkreślić, że z obecnie produkowanych półprzewodnikowych czujników praktycznie na rynku znajdują się tylko czujniki ciśnienia, przyspieszenia, temperatury i pośrednio siły. W konstruowaniu inteligentnych przetworników można wyróżnić dwa podejścia. Jedno polega na umieszczeniu czujników w postaci matrycy, multipleksera, przetwornika A/C oraz mikroprocesora w jednej strukturze (monolitycznej lub hybrydowej). Drugie, szczególnie przydatne przy pomiarze innych wielkości niż wymienione, polega na oddzieleniu czujników od struktury, którą w tym podejściu jest seryjnie produkowany procesor jednoukładowy z wejściami analogowymi, częstotliwościowymi lub cyfrowymi. Najważniejszymi elementami inteligentnego przetwornika, obok czujników, są baza wiedzy oraz struktura, która zezwala na przetwarzanie informacji z zewnątrz oraz na korzystanie z bazy wiedzy.

Struktury przetworników można usystematyzować według następujących kryteriów:

- liczby wejść, liczby wielkości mierzonych x_n,
- liczby parametrów w modelu,
- złożoności systemu (algorytmu), rzędu modelu, wielkości bazy wiedzy



Rys.13. Podział przetworników

Podział przetworników ze względu na stopień złożoności przedstawia rys.13.

Na podstawie tak przyjętych kryteriów inteligentne przetworniki można podzielić na:

a) funkcyjne (pośrednie), w których sygnał wyjściowy jest funkcją jawną lub uwikłaną sygnałów wejściowych. Można tu wyróżnić przetworniki:
   - o pomiarze jednokrotnym (o próbkowaniu pojedynczym) - korzysta się wówczas z prostego modelu opisującego przetwornik $y = F(x_1,x_2...x_n)$,
   - o pomiarze wielokrotnym (o próbkowaniu wielokrotnym) - korzysta się wówczas najczęściej z modelu w postaci funkcji uwikłanej $F(x_1.x_2,...,x_n. y_1, y_2, ...,y_k) = 0$;
   - o pomiarze wielokrotnym w określonym przedziale czasu (realizacji) - korzysta się wówczas najczęściej z funkcji opisujących procesy losowe, np. funkcji gęstości, rozkładu amplitud, korelacji gęstości widmowej mocy itd. Wpływ zakłóceń na tego rodzaju przetworniki jest pomijalny, gdyż zazwyczaj korzysta się z czujników o dużej czułości, a więc o małych błędach;
b) kompensacyjne (inwariantne), których rozbudowa struktury umożliwia ograniczenie wpływu zakłóceń; w praktyce można wyróżnić dwa podejścia: jedno polegające na wcześniejszym określaniu charakterystyk przetwarzania dla poszczególnych wielkości zakłócających, drugie na pomiarze pośrednim zakłóceń, zwłaszcza wtedy, gdy są one pomiarowo niedostępne;
c) rozmyte, baza wiedzy jest zbiorem reguł, które opisują działanie przetwornika;

d) ekspertowe, bazujące na metodach heurystycznych oraz wiedzy eksperta, który pomaga w zbudowaniu bazy wiedzy;
e) uczące się, czyli zmieniające automatycznie bazę wiedzy w procesie uczenia na podstawie zdobywanych doświadczeń; można tu wyróżnić systemy symboliczne i subsymboliczne;
f) nadmiarowe sprzętowe, w których rozbudowuje się system o dodatkowe kanały pomiarowe lub całe przetworniki w celu zwiększenia niezawodności toru pomiarowego.

Literatura

[1] Bringell J. E.: Systemy z czujnikami inteligentnymi. Elektronizacja 5/94.

[2] Bryzek J.: Zaawansowane przetwarzanie sygnałów w czujnikach inteligentnych. Elektronizacja 5/94.

[3] Cvetkov E.I.: Procesornyje izmierytielnyje sredstwa. Energia, Leningrad 1989r.

[4] Jachowicz R. Weremczuk J.: Typy czujników inteligentnych. Materiały Konferencji Naukowej COE'92, Zegrze k / Warszawy 1992r.

[5] Jachowicz R. Weremczuk J.: Czujniki inteligentne we współczesnej aparaturze pomiarowej. Elektronizacja 11/92.

[6] Jachowicz R. Weremczuk J.: Uniwersalny interfejs dla czujników inteligentnych. Materiały VIII Krajowej Konferencji Metrologii, Zegrze k / Warszawy.1995r.

[7] Kwaśniewski J.: Wprowadzenie do inteligentnych przetworników pomiarowych, WNT, Warszawa 1993r.

[8] Lesiak P.T.: Inteligentna technika pomiarowa,WNT, Warszawa ,2001r.

[9] Moroń Z.: Czujniki inteligentne, Materiały XXXII Krajowej Konferencji Metrologii, Rzeszów 2000r.