

# Algorytm tachometru

Jerzy Niewiatowski

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono inżynierskie podejście do rozwiązania zadania budowy tachometru: od analizy teoretycznej do realizacji układowej. Skupiono się na realizacji algorytmu cyfrowego jako bardziej aktualnego ze względu na obecnie stosowane technologie. Cechą wyróżniającą opisany algorytm, od innych powszechnie stosowanych realizacji [5, 6, 8, 9] jest jego zdolność do eliminacji błędu zliczania impulsów. Opisano implementację algorytmu w mikrokontrolerze jako programowalnej, sekwencyjnej, synchronicznej maszynie cyfrowej i wykazano łatwość realizacji takiej implementacji w odróżnieniu od, na pewno szybszej maszynie nieprogramowalnej, ale kłopotliwej ze względu na konieczność rozproszenia układu na część, która realizuje algorytm tachometru i część obliczeniową. Dodatkową zaletą implementacji tego algorytmu w mikrokontrolerze jest to, że błąd wynikający z opóźnienia działania maszyny sekwencyjnej będzie wartością stałą, tzn. łatwą do korekty. Przedstawiony algorytm powstał podczas opracowywania multitachometru DMT-30 produkowanego przez PIAP i został też zastosowany w produkowanym w PIAP tachografie kolejowym T-130P.

**Słowa kluczowe:** pomiar, tachometr, prędkość obrotowa, algorytm, mikrokontroler

## Wprowadzenie

Tachometr jest urządzeniem służącym do pomiaru prędkości poruszającego się ciała lub substancji (z greck. *tachos* – prędkość, *metron* – mierzyć). Najczęściej tachometr jest stosowany do pomiaru prędkości obrotowej wału napędowego w silniku lub prędkości obrotowej koła w pojeździe, ale też jest podstawą budowy przepływomierza turbinowego. Tachometr wykonany w postaci prądniczki umożliwia odczyt bezpośredni – analogowy. Może być też zbudowany jako układ całkujący impulsy ze specjalnego czujnika, który przekształca obroty mechaniczne na impulsy elektryczne. Tak otrzymane wyniki charakteryzują się tym, że mają wyeliminowane błędy przypadkowe i okresowe dzięki całkowaniu, odpowiednio: elektromechanicznemu w prądnicy czy też impulsów elektrycznych na kondensatorze.

Obecnie tachometr wykonuje się najczęściej jako cyfrowe urządzenie zliczające odbierające sygnał z impulsatora odpowiednio montowanego przy obiekcie, którego prędkość ma być mierzona. Prosta implementacja w elektronicznej maszynie cyfrowej często powoduje, że zapomina się, iż w większości zastosowań podstawową cechą tachometru powinna być eliminacja błędów pomiarowych realizowana dzięki wbudowanemu całkowaniu, co „umyka” wraz ze zbyt dużym uproszczeniem algorytmu. Dalej zostanie opisany sposób rozwiązania tego problemu.

## Podstawy teoretyczne pomiaru

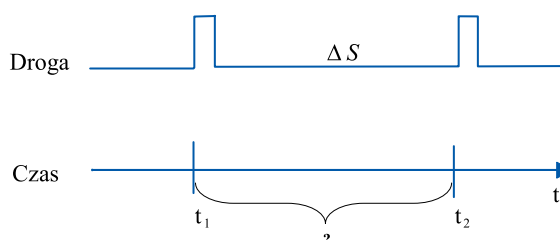
Analizując powszechnie znaną zależność (1) definiującą prędkość liniową:

$$V = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

gdzie:  $V$  – prędkość,  $S$  – droga,  $t$  – czas, można zauważyć, że w tachometrze  $S$  – droga jest parametrem, który (w zależności od rodzaju obiektu mierzonego) może być stały lub zmienny, natomiast niewiadomą będzie  $t$  – czas, który powinien być zmierzony na odpowiadającym mu odcinku drogi, więc (2):

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta S}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

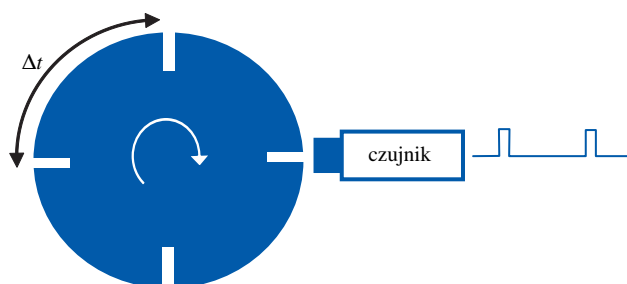
co dla ustalenia uwagi przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Czas jako niewiadoma w pomiarze prędkości

Fig. 1. Time as an unknown in measurement of velocity

Droga  $\Delta S$  jest tu przedstawiona jako odległość między dwoma impulsami nadajnika impulsów zamontowanego na obiekcie, którego prędkość ma być zmierzona. Jeśli nadajnikiem impulsów jest enkoder (na którym skupiono się w tych rozważaniach), to można mierzyć czas między impulsami na 1 obrót, co da prędkość obrotową lub, po obliczeniu odległości między impulsami, prędkość liniową (obwodową). Zobrazowano to na rys. 2, na którym tarcza enkodera ma przykła-



Rys. 2. Budowa enkodera

Fig. 2. The encoder inside

dowo  $n = 4$  znaczniki na obwodzie, tak więc chcąc zmierzyć prędkość obrotową tarczki otrzymuje się (3):

$$V_{obr} = \frac{1}{n \cdot \Delta t} \quad (3)$$

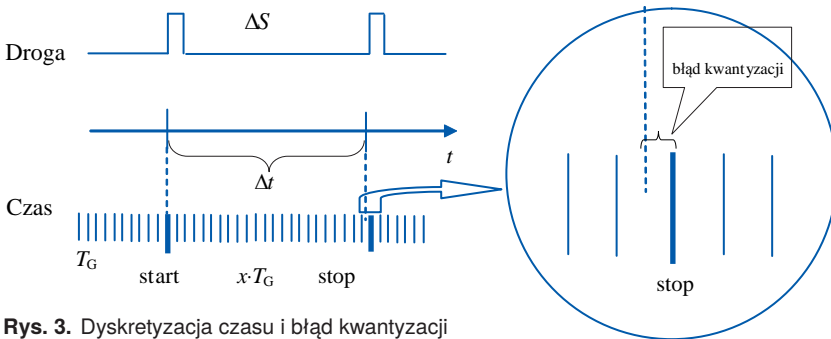
gdzie  $n$  – liczba znaczników na obwodzie enkodera.

Chcąc zmierzyć prędkość obwodową wzór przyjmie postać (4):

$$V_{lin} = \frac{2\pi \cdot r}{n \cdot \Delta t} \quad (4)$$

gdzie:  $r$  – promień tarczki.

Z tego wynika, że aby uzyskać wartość prędkości obrotowej lub liniowej badanego obiektu trzeba zmierzyć czas. Podejście cyfrowe determinuje dyskretyzację, tak więc do pomiaru czasu trzeba użyć generatora o odpowiednio małym kwancie tak, aby błąd dyskretyzacji nie wpływał znacząco na wynik pomiaru. Licząc impulsy z generatora o znanym okresie między np. dwoma impulsami z enkodera, otrzyma się wynik z błędem kwantyzacji (max)  $\pm 1$  okres tegoż generatora (rys. 3).



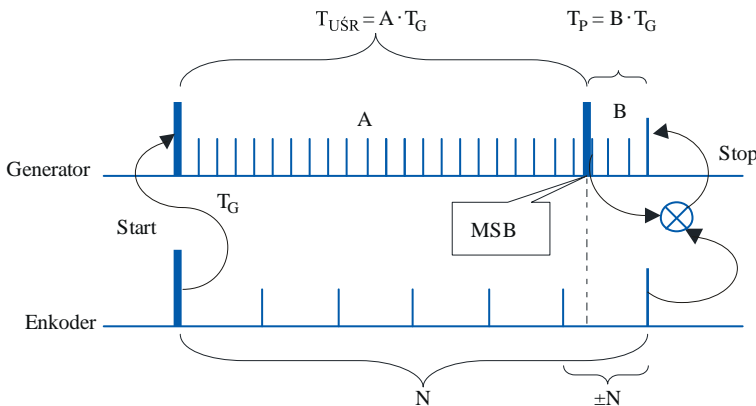
Rys. 3. Dyskretyzacja czasu i błąd kwantyzacji  
Fig. 3. Time discretization and error of quantization

Wynik pomiaru czasu z błędem kwantyzacji opisuje wzór (5):

$$\Delta t = x \cdot T_G \pm T_G \quad (5)$$

gdzie:  $T_G$  – okres generatora,  $x$  – liczba zliczonych impulsów generatora.

Wzór wykazuje, że czym większy okres generatora, tym większy będzie błąd kwantyzacji (tu błąd samego generatora został pominięty).



Rys. 4. Sposób na wyeliminowanie błędów okresowych i zliczania  
Fig. 4. Manner on elimination of periodic and reckoning errors

Górną granicę częstotliwości generatora wyznaczają m.in. możliwości układowe, wielkość bufora zliczającego, czas przełączania (siła procesora) itp., a dolną – założona dokładność pomiaru. Dla przeważającej liczby zadań i przy obecnie stosowanej technologii osiągnie się zadowalającą prędkość obliczeniową, a błąd kwantyzacji nie będzie znacząco wpływał na dokładność pomiaru.

We wzorze na prędkość liniową (6)

$$V_{lin} = \frac{2\pi \cdot (r \pm \Delta_b r)}{n \cdot \Delta t} = \frac{2\pi \cdot (r \pm \Delta_b r)}{n \cdot (xT_G \pm T_G)} \quad (6)$$

gdzie:  $\Delta_b r$  – błąd pomiaru promienia tarczki, występuje  $r$  – promień tarczki enkodera pomnożony przez stałą  $2\pi$ . Wartość promienia tarczki trzeba zmierzyć na obiekcie, co może znacząco wpłynąć na dokładność pomiaru, gdyż każda niedokładność pomnożona zostanie przez ww. stałą.

Wzór na błąd względny pośredni pomiaru prędkości liniowej (7):

$$\delta v_{lin} = \frac{\Delta_b r}{r} + \frac{\Delta_b t}{t} = \frac{\Delta_b r}{r} + \frac{T_G}{x \cdot T_G} = \frac{\Delta_b r}{r} + \frac{1}{x} \quad (7)$$

gdzie:  $x$  – liczba zliczonych impulsów generatora, pokazuje, że rzeczywiście pomiar promienia tarczki ma przeważający wpływ na dokładność pomiaru prędkości liniowej, gdyż składnik błędu wynikający z pomiaru czasu, w większości przypadków będzie pomijalny.

## Pomiar: od teorii do praktyki

Rozpatrzmy dwa podejścia do zagadnienia pomiaru czasu w omawianym układzie.

1. Metoda prostsza i bardziej intuicyjna – należy zliczyć impulsy generatora pomiędzy dwoma impulsami z enkodera (rys. 3). Aby zmniejszyć błąd przypadkowy pomiaru wy-

### Oznaczenia na rysunku:

- $T_G$  – okres generatora,
- $T_{USR}$  – czas uśrednienia (dobierany),
- $T_P$  – czas poprawki,
- A – liczba impulsów generatora współczynnika uśrednienia (stała),
- B – liczba impulsów generatora poprawki,
- N – liczba impulsów z enkodera,
- $\pm N$  – błąd zliczania impulsów enkodera liczbowo równy  $1/N$ ,
- MSB – (ang. *Most Significant Bit*) najbardziej znaczący bit, flaga.

konuje się kilku takich pomiarów (zwykle 5–10), a ich wyniki uśrednia. Metoda ta jest przydatna do pomiaru prędkości chwilowej. Jednak w większości zastosowań potrzebna jest wartość średnia prędkości obrotowej za pewien, odpowiednio dobrany, okres. Nie ma tu jednak możliwości dobrania ww. okresu uśredniania, gdyż czas pomiaru będzie się zmieniał odwrotnie proporcjonalnie do zmian prędkości.

2. Metoda polega na zliczaniu impulsów enkodera w zadanym czasie, tak dobranym do zakresu pomiaru, aby następowało uśrednianie dla zniwelowania okresowych błędów wynikłych z nierównomierności wykonawczych mechaniki czy charakteru ruchu, ale też by wyniki pomiaru były dostępne w rozsądnych odstępach czasu. Tak więc metoda ta da możliwość dobrania okresu całkowania do specyficznych warunków zadania.

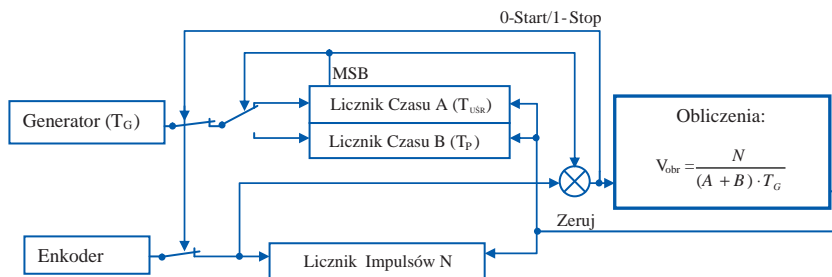
Dalej skupiono się na metodzie 2. Najłatwiej ilustruje to rysunek (rys. 4).

Należy zauważyć, że wprowadzenie  $T_p$  – czasu poprawki spowoduje zredukowanie wartości błędu zliczania impulsów z enkodera równego  $1/N$  do wartości błędu kwantyzacji czasu równego  $1/x$ . Osiąga się to niewielkim (najczęściej) kosztem zmiany czasu uśredniania.

Zależność na prędkość obrotową przyjmuje postać (8):

$$V_{obr} = \frac{N}{T_{USR} + T_p} = \frac{N}{A \cdot T_G + B \cdot T_G} = \frac{N}{(A + B) \cdot T_G} \quad (8)$$

Do wykonania zadania potrzebny jest generator, liczniki i układ logiki wykonujący zadany algorytm. Najlepiej pasuje tu użycie mikrokontrolera, w którym łatwo można zaimplementować algorytm dzięki programowalnej jednostce ALU i łatwodostępnym zasobom, takich jak liczniki, timery, bufora itd. Schemat blokowy algorytmu liczenia prędkości obrotowej przedstawiono na rys. 5.

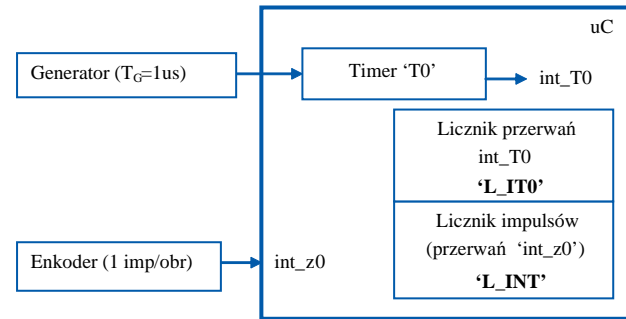


Rys. 5. Schemat blokowy algorytmu tachometru  
Fig. 5. Scheme of block algorithm of tachometer

Analiza schematu blokowego (rys. 5) pokazuje, że główną trudność w realizacji zadania tachometru stanowią obliczenia. To z kolei łatwo jest wykonać mając do dyspozycji komputer.

Dalej przedstawiona zostanie praktyczna realizacja tachometru z użyciem mikrokontrolera ( $\mu C$ ) o następujących parametrach układowych (rys. 6):

- zakres timera T0 16 bit  $\equiv 2^{16} = 65\,536$ ,
- zakres L\_INT 24 bit  $\equiv 2^{24} = 16\,777\,216$  (przykładowo),
- okres generatora  $T_G = 1\ \mu s$ ,
- enkoder 1 imp/obr.



Rys. 6. Realizacja układowa algorytmu tachometru w mikrokontrolerze

Fig. 6. Systemic realization of algorithm in microcontroller

Czas uśrednienia ustalono na 0,5 s tak, żeby wyniki obliczeń pojawiały się w wygodnych dla użytkownika odstępach czasu. Jednocześnie: 0,5 s dla powszechnie występujących prędkości obrotowych jest czasem wystarczająco długim dla uśrednienia wyników. Tak więc chcemy, aby (9):

$$x \cdot T_0 \cdot T_G = 0,5\ s \quad (9)$$

tu:  $x$  – niewiadoma,  $T_0$  – wartość z timera, dalej:

$$x \cdot 65\,536 \cdot 10^{-6} = 0,5 \quad (10)$$

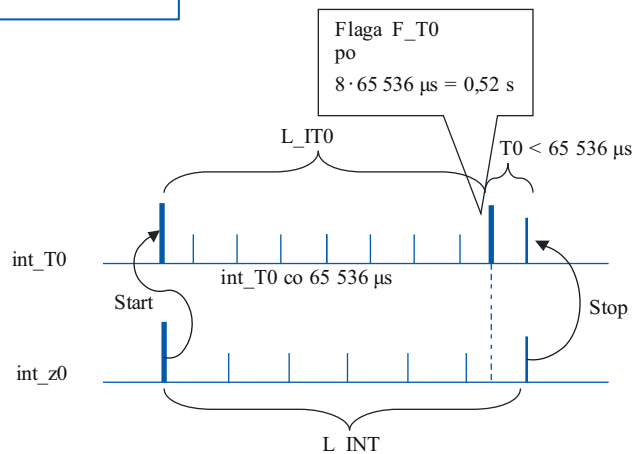
i

$$x = \frac{0,5}{65\,536 \cdot 10^{-6}} = 7,63 \quad (11)$$

otrzymana wartość jest ułamkowa. Żeby pozbyć się ułamka zaokrąglimy  $x$  do 8, co spowoduje, że czas uśredniania osiągnie wartość (12):

$$8 \cdot 65\,536 \cdot 10^{-6} \approx 0,52\ s. \quad (12)$$

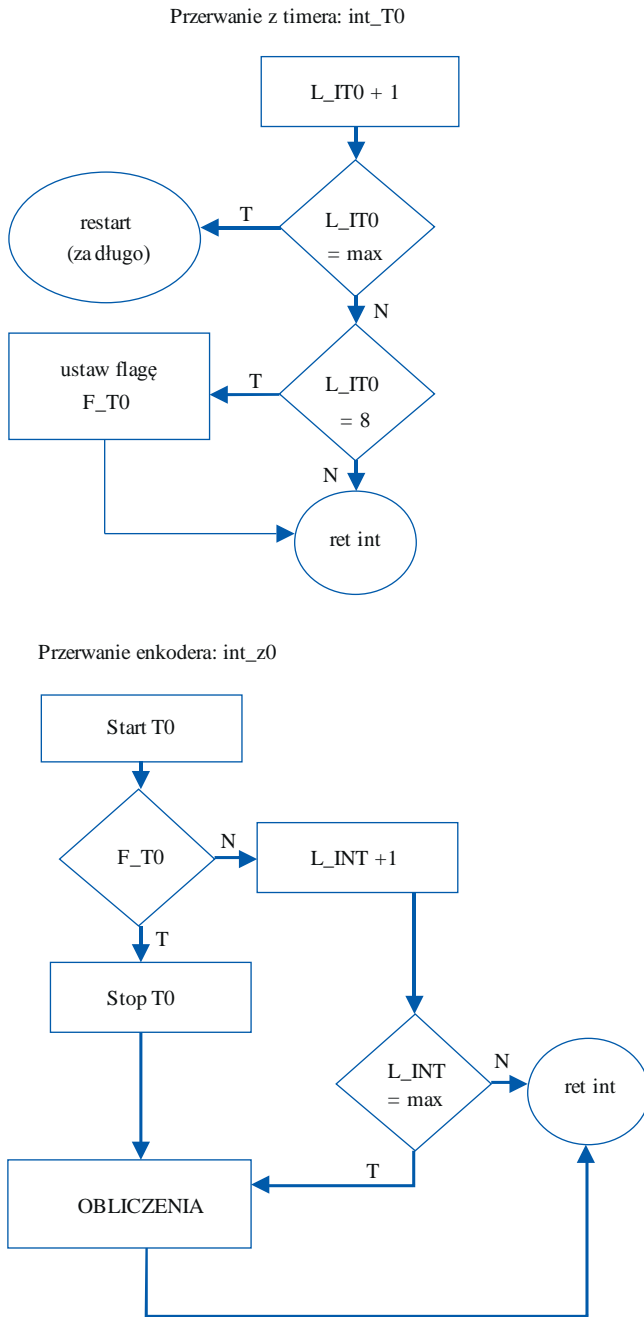
Zabieg ten znacznie uprości algorytm i skróci czas obliczeń. Teraz zakładane przebiegi czasowe będą wyglądały następująco (rys. 7):



Rys. 7. Przebiegi czasowe implementacji algorytmu tachometru w mikrokontrolerze

Fig. 7. Time diagrams of tachometer's implementation in microcontroller

Algorytm obsługujący przerwanie może wyglądać jak na rys. 8.



Rys. 8. Algorytm tachometru  
Fig. 8. Tachometer's algorithm

W tej implementacji wzór na obliczenie prędkości obrotowej będzie miał postać (13):

$$V_{obr} = \frac{60 \cdot 10^{-6} \cdot L\_INT}{65536 \cdot L\_IT0 + T0} \text{ obr./min} \quad (13)$$

Dla zwiększenia dokładności można jeszcze wnieść poprawkę wynikającą z czasu przyjęcia przerwania. Poprawka ta będzie wartością stałą, co znacznie upraszcza zadanie.

## Realizacje układowe

Opisany algorytm tachometru cyfrowego został zastosowany w budowanych urządzeniach w ramach prac wykonywanych w PIAP, takich jak multitachometr DMT-30 produkowany jeszcze do niedawna w PIAP i w obecnie produkowanym tachografie kolejowym T-130P. Tachograf kolejowy posiada „Świadectwo dopuszczenia do eksploatacji typowego elementu pojazdu kolejowego” wydane przez Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego Rzeczypospolitej Polskiej, a także jest laureatem godła „Teraz Polska” i licznych wyróżnień.



Rys. 9. Tachograf kolejowy T-130P-mp  
Fig. 9. Railroad Tachograph T-130P-mp

## Podsumowanie

Charakterystycznym dla opisanego metody (pomiar prędkości obrotowej przez liczenie impulsów w zadanym czasie) jest błąd wynikły ze zliczania impulsów, gdzie niepewność wynosi jeden impuls. Z tego powodu mnoży się w enkoderach ich liczbę (N), która nierzadko dochodzi do kilku tysięcy na obrót, gdyż błąd względny będzie równy 1/N [7-9]. Przedstawiony algorytm, jak wykazano, ominął to źródło błędów kosztem zmiany czasu uśredniania (rys. 4). Może się zdarzyć, że przy bardzo małych prędkościach obrotowych i małej liczbie impulsów na obrót, czas, po którym otrzyma się wynik z tego algorytmu może być już zbyt długi. Ale są to przypadki szczególne [10]. Dzięki opisanemu algorytmowi można, bez zmniejszenia dokładności pomiaru, użyć łatwo realizowalnego układu impulsatora, np. z jednym znacznikiem na obwodzie. Jest to ważne przy niestandardowych zastosowaniach tachometru w trudnych warunkach często spotykanych w przemyśle.

## Bibliografia

1. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A., *Metrologia elektryczna*, WNT Warszawa 2000, ISBN 978-83-204-3546-7.
2. Misurewicz P., *Podstawy techniki mikroprocesorowej*, WNT Warszawa 1991, ISBN 83-204-1339-7.
3. Traczyk W., *Układy cyfrowe*, WNT Warszawa 1989, ISBN 83-204-0760-5.

4. Turkowski M., *Przemysłowe sensory i przetworniki pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002, ISBN 83-7207-222-1.
5. Miłek M., *Pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi*, Podręcznik akademicki, Zielona Góra, 1998.
6. Kaczmarek Z., *Pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi*, skrypt nr 215, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1999.
7. Pałka P., *Pozycjonowanie i nadążanie minirobota kołowego*, Rozprawa Doktorska, AGH Kraków, WIMiR.
8. Kujanek W., *Pomiar prędkości obrotowej. Pomiar siły*, Instrukcja do ćwiczenia 6a, Instytut Metrologii Elektrycznej Uniwersytet Zielonogórski.
9. Łukajniuk A., Walendziuk W., *Pomiar prędkości obrotowej*, Ćwiczenie nr 8, Politechnika Białostocka WE.
10. Przybył A., *Realizacja w układzie FPGA algorytmu pomiaru prędkości, bazującego na kompensowanym enkoderze inkrementalnym*, Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010, Politechnika Częstochowska KIK. ■

### Algorithm of tachometer

**Abstract:** Engineering approach present in article to decide task of structure tachometer from theoretical analysis for systemic realization. It concentrate on realization of numeric algorithm because it is applicable from the point of view of presently current technologies more. Described algorithm feature differring, from other realization generally applicable, ability is for elimination of error of reckon impulse. Further, it describe implementation of algorithm in microcontroller as sequence programmable, synchronous numeric machine and facility of realization of such implementation in distinguishing from, surely fastest, machine not programmable, but from the point of view of perplexing necessity of dispersion on part, which realizes algorithm of tachometer and computational part. Facility of implementation of this algorithm is additional revealed in microcontroller, that emerged from delay of operation of sequence machine error will be constant value i.e. easy for correction. Task of tachometer structure seems simple. However, different ideas appear at penetrate to problem on its solution. It is good to observe as for it step up other.

**Keywords:** measure, tachometer, angular velocity, algorithm, microcontroller

### inż. Jerzy Niewiatowski

Studia ukończył na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Pracował jako konstruktor w firmach prywatnych Elmier, Vigo, Telka. Aktualnie pracuje w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów na stanowisku konstruktora.  
e-mail: [jniewiatowski@piap.pl](mailto:jniewiatowski@piap.pl)



REKLAMA

## Sterowanie w automatyce portal branżowy



- Aktualności z branży • Pliki • Giełda
- Katalog firm • Baza wiedzy • Praca
- Kalendarz imprez • Kursy • Forum

**Wyślij zapytanie ofertowe**



**i wygraj  
pendrive**

**Reklama Twojej firmy od**



**490 zł.  
netto za rok**

ponad  
2500 klientów  
czekających na  
Twoją ofertę