

Aleksander Simicz*

Analiza możliwości sterowania rozproszonego z wykorzystaniem technologii GPRS

1. Wstęp

Monitorowanie i sterowanie oddalonych od siebie obiektów jest ważnym zagadnieniem. Telemetria znajduje zastosowanie przy kontroli pracy urządzeń energetycznych, takich jak: sieci elektroenergetyczne, instalacje dostarczające ropę czy gaz. Może też być zastosowana m.in. do zarządzania flotą pojazdów transportowych, w inteligentnych budynkach, jak również w układach pomiarowo-kontrolnych w dużych systemach, np. sieciach przesyłu gazu.

Techniki telemetryczne dzielą się na przewodowe i bezprzewodowe. W przypadku pierwszym oczywistym ograniczeniem jest medium transmisyjne. Musimy każdy z elementów systemu połączyć ze sobą za pomocą kabla lub światłowodu. Koszty rosną wraz z odległością. Sporym utrudnieniem są wszelkiego rodzaju przeszkody wynikające z zabudowy miejskiej. Prace ziemne wymagają zezwoleń. Sygnał transmitowany przez łącze ulega osłabieniu, co wymaga zastosowania wzmacniaczy. Tworzenie dedykowanego systemu telemetryki przewodowej jest więc nieefektywne przy dużych odległościach. Lepszym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie sieci Internet ze względu na jej dobrze rozbudowaną infrastrukturę. Telemetria przewodowa nie nadaje się jednak do rozwiązań mobilnych, ponadto nie wszędzie mamy dostęp do sieci Internet.

W przypadku telemetryki bezprzewodowej możemy stworzyć własny system radiomodemowy (np. z wykorzystaniem radiomodemów Satel [5]) lub wykorzystać sieć telefonii komórkowej. Wadą pierwszego rozwiązania jest konieczność stworzenia i późniejszej konserwacji całej infrastruktury telemetrycznej, a więc również wzmacniaczy – przekazników. Nadawanie sygnału radiowego wymaga koncesji, co wiąże się z dodatkowymi kosztami i skomplikowanymi procedurami prawnymi.

Innym rozwiązaniem telemetryki bezprzewodowej jest zastosowanie istniejącej struktury sieci telefonii komórkowej. Przykładowo, w sieci GSM (*Global System for Mobile Communications*) istnieją następujące techniki przesyłania informacji (AB-MICRO 2004):

* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

- SMS – *Short Message Service* polega na przesyłaniu wiadomości tekstowych o długości nie przekraczającej 160 znaków. Opłata za jedną taką wiadomość jest stała. Konieczność odpowiedniego formatowania ogranicza zastosowanie tej techniki w teledystrybucji. Dobrym zastosowaniem takiej formy komunikacji jest wysyłanie informacji alarmowych.
- CSD (HSCSD – *High Speed Circuit Switched Data*) – *Circuit Switched Data* jest komunikacją za pomocą komutacji łączy. Opłata za tę usługę zależy od czasu trwania połączenia. Nie jest to więc rozwiązanie dobre w teledystrybucji.
- GPRS – *General Packet Radio Services* jest oparta na komutacji pakietów z wykorzystaniem protokołów transportowych TCP/IP oraz UDP/IP. Cena usługi zależy od ilości przesyłanych danych. Jest to dobre rozwiązanie w teledystrybucji, zwłaszcza przy przesyłaniu niewielkiej ilości informacji.

Parametry wybranych, bezprzewodowych systemów teledystrybucyjnych, zostały przedstawione w tabeli 1.

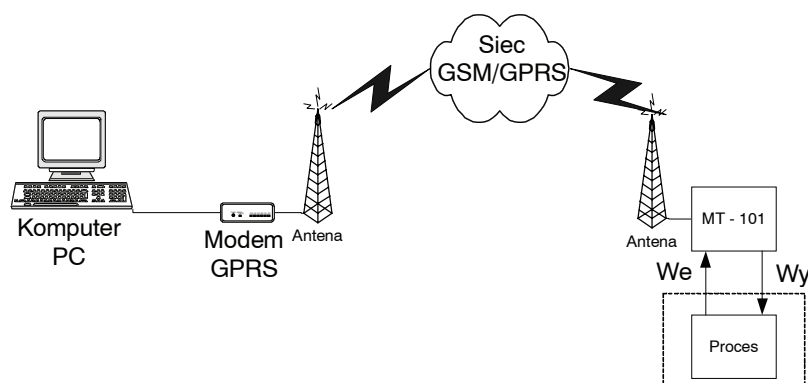
Tabela 1
Parametry systemów bezprzewodowych

Parametry	SMS	HSCSD	GPRS	Radiomodemy SATEL
Zasięg	Wszystkie sieci GSM	W Polsce tylko w sieci Plus GSM	Zasięg w Polsce nieco mniejszy niż GSM	do 80 km
Prędkość transmisji	1200/2400/4800/ 9600 bit/s	57,6 kbps (przy wykorzystaniu 4 kanałów), bądź 43,2 kbps (3 kanały na odbior, 1 na wysyłanie)	Obecne telefony GPRS umożli- wiają odbieranie danych z szyb- kościami do 53,6 kbit/s	1200÷9600 bps
Częstotliwość	900/1800 MHz	900/1800 MHz	900/1800 MHz	400 MHz/868÷ 870 MHz
Przykładowy koszt przesyłu danych	0,18 zł nie wię- cej niż 160 znaków alfanumerycz- nych kodo- wanych na 7 bitach lub nie więcej niż 140 bajtów danych w postaci binar- nej, zgodnie z normami ETSI GSM	0,24 zł/min	30,00 zł/mies (limit 50 MB) 60,00 zł/mies (limit 150 MB) 120,00 zł/mies (limit 500 MB)	12÷29 euro/mies

Celem pracy jest pokazanie, czy i jakiej klasy obiekty dynamiczne można sterować lub monitorować za pomocą technologii GPRS. Z punktu widzenia sterowania najważniejszym parametrem jest czas obiegu pakietu zawierającego informacje o stanie procesu i sygnały sterujące. Kolejną kwestią jest wybór sposobu synchronizacji w układzie sterowania. Odpowiedzi na to pytanie można udzielić, analizując wielkość i charakter opóźnień transmisji oraz liczbę odrzuconych pakietów.

2. Pomiar prędkości transmisji danych w sieci GPRS

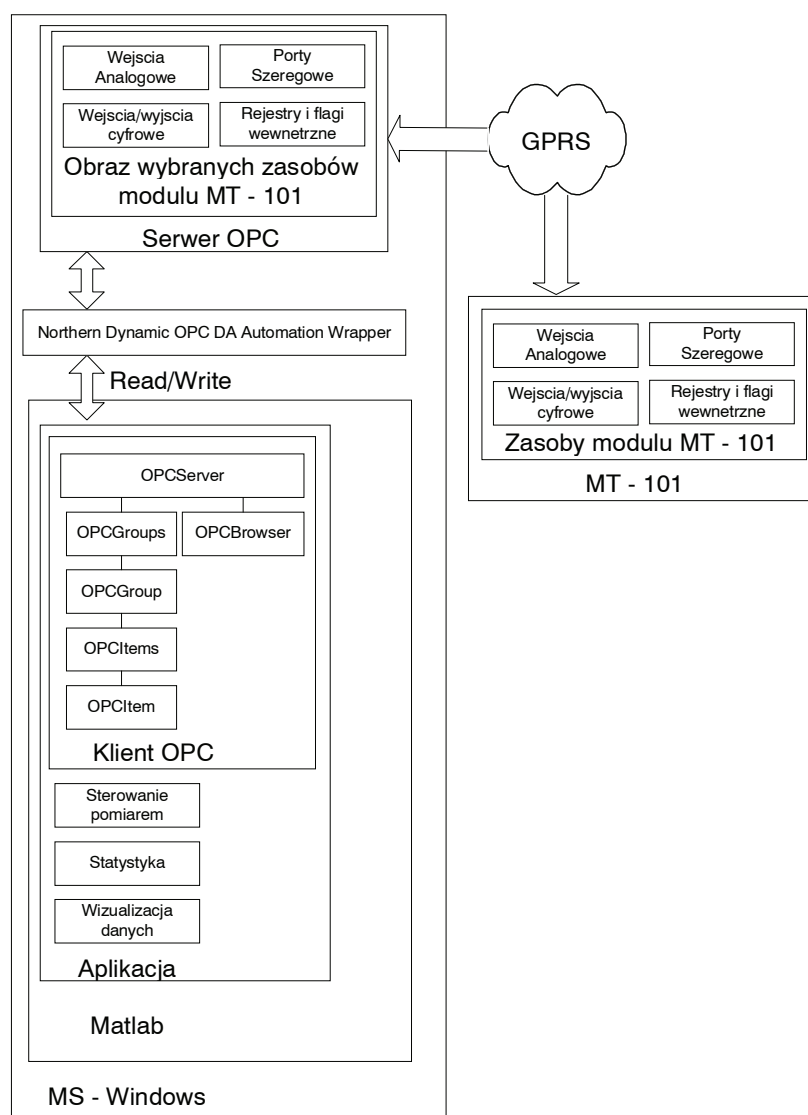
Podstawowymi problemami pojawiającymi się podczas prób adaptacji technologii do zastosowań przemysłowych są opóźnienia i zagubienia pakietów (opóźnienia których czas trwania przekracza akceptowalną wartość) [2, 4]. W celu realizacji sterowania rozproszonego lub monitorowania w sieci GPRS należy wstępnie określić charakter opóźnień, w celu zastosowania odpowiedniego algorytmu sterowania, a następnie sprawdzić, dla jakich typów obiektów fizycznych opóźnienia wnoszone przez medium transmisyjne (sieć GPRS) będą małe w stosunku do stałych czasowych występujących w tych obiektach. Na podstawie eksperymentów z pomiaru prędkości transmisji zostanie wyznaczony maksymalny czas oczekiwania na dane transmitowane przez GPRS (timeout) oraz metoda odtwarzania sterowania w wypadku nieotrzymania przez moduł telemetryczny ramek z aktualnym sterowaniem. Algorytm ten musi z jednej strony być na tyle prosty, aby nie zużywać zbyt wiele ograniczonych zasobów stosowanego modułu telemetrycznego (należy zwrócić uwagę, że pisanie złożonych programów w środowisku dostarczonym przez producenta modułu jest uciążliwe) oraz aby ekstrapolowane sterowanie było zbliżone do rzeczywistego.



Rys. 1. Budowa stanowiska laboratoryjnego do pomiaru prędkości transmisji w sieci GPRS

Do testowania transmisji danych został wykorzystany układ przedstawiony na rysunku 1. Głównym jego elementem jest moduł telemetryczny MT-101. Jest on sterownikiem przemysłowym mającym możliwość pracy w sieci GSM/GPRS. Posiada wejścia analogowe, wejścia i wyjścia binarne oraz porty szeregowo (AB-MICRO 2004). Wejścia binarne mogą pracować jako wejścia licznikowe, ponadto wyjścia binarne mogą pełnić funkcję wejść binarnych. Wejścia binarne mogą również pracować w trybie konwersji częstotliwości

sygnału wejściowego na wartość analogową, co pozwala na pomiar wielkości analogowych po zastosowaniu dodatkowych przetworników U/f (napięcie/częstotliwość) lub I/f (prąd/częstotliwość). Na komputerze nadrzędnym (PC) jest uruchomiona aplikacja w Matlabie komunikująca się z serwerem OPC [7] udostępniającym zasoby modułu MT-101. Serwer OPC (*OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control*), wymienia dane z modulem MT-101 za pośrednictwem modemu GPRS. Szczegóły dotyczące konfiguracji i uruchamiania systemu zostały opisane w pozycji [8].



Rys. 2. Przepływ danych dla stanowiska z rysunku 1

Na rysunku 2 przedstawiono przepływ sygnałów w układzie. Zasoby sprzętowe modułu MT-101 są dostępne na komputerze nadrzędnym dzięki serwerowi OPC. Serwer ten jest uruchamiany z plikiem konfiguracyjnym xml określającym m.in., do jakich zasobów chcemy mieć dostęp. Dane te będą przesyłane pomiędzy modulem MT-101 a komputerem PC poprzez sieć GPRS, jako ramki protokołu przemysłowego MODBUS.

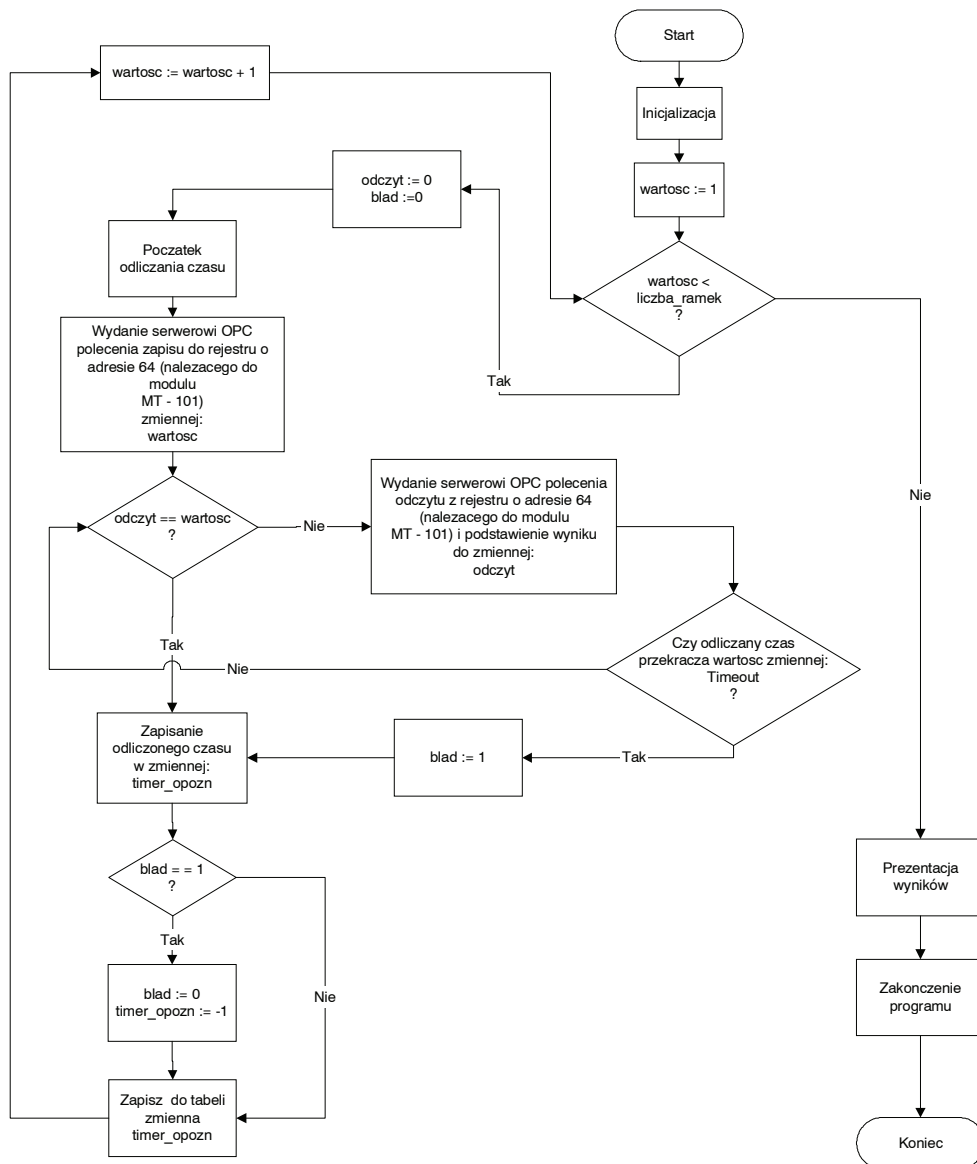
W dalszej części pracy porównano ze sobą dwa sposoby transmisji. Pierwszy z nich polegał na ciągłym wysyłaniu i odbieraniu danych (oznacza to że wysyłanie porcji danych następowało bezpośrednio po odebraniu potwierdzenia dostarczenia poprawnego pakietu), w drugim natomiast wysyłanie ramek odbywało się ze stałym interwałem czasowym. Aplikacje służące do przeprowadzenia pomiarów zostały napisane w Matlabie. Środowisko to pozwoliło na prezentację wyników w postaci wykresów oraz danych statystycznych (np. wariancja, wartość średnia). Dzięki użyciu darmowej biblioteki DLL (*Dynamic Link Library*) „Northern Dynamic OPC Automation Wrapper” [6, 7] możemy utworzyć obiekty ActiveX spełniające rolę klienta OPC, co pozwala na dostęp do zasobów serwera OPC.

Matlab wprowadza niewielki narzut czasowy w porównaniu do transmisji w sieci GPRS. Wykazano, że wywołanie w pętli instrukcji podstawienia do zmiennej wartości 1 spowoduje opóźnienie 0,0150 sekund przy 968 796 iteracjach. Czas ten zależy również od aktualnego obciążenia komputera PC i w niektórych wypadkach znajduje się poniżej progu czułości funkcji mierzącej czas w Matlabie. Dla 10 000 iteracji czas ten zawsze jest poniżej tego progu. Pojedyncza instrukcja wprowadza więc niezauważalny narzut czasowy.

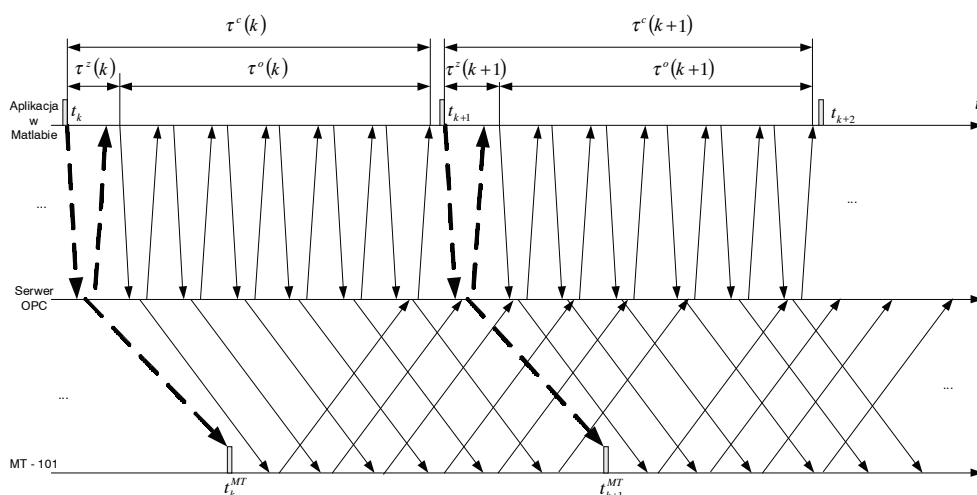
3. Pomiar prędkości ramek wysyłanych w sposób ciągły

Na rysunku 3 jest przedstawiony sposób działania algorytmu mierzącego prędkość wymiany danych pomiędzy modulem MT-101 a komputerem nadrzędnym dla ciągłej transmisji danych. Parametrem wejściowym tej procedury jest maksymalny czas oczekiwania (w sekundach) oznaczony jako *Timeout* (w naszym wypadku wynosi 30 sekund) oraz liczba cykli zapisu/odczytu oznaczona jako *liczba_ramek* (w naszym wypadku wynosi 15300). Pierwszym krokiem jest inicjalizacja. Obejmuje ona czynności omówione w pozycji [8], a służące do stworzenia obiektu typu OPCItem dla rejestru o adresie 64 w module MT-101. Podczas tej fazy jest również zerowana tablica, w której gromadzone są czasy transmisji. W każdym obiegu głównej pętli programu jest zwiększana o jeden zmienna o nazwie *wartosc*. Przyjmuje ona wartości od jeden do *liczba_ramek*. Zmienna *wartosc* jest wysyłana do wspomnianego rejestru w module MT-101. Następnie aplikacja dokonuje odczytu z serwera OPC aż do momentu stwierdzenia, że moduł MT-101 już zapisał tę zmienną lub do momentu upływu zadanego czasu *Timeout*. Odczyt jest dokonywany przez wysłanie serwerowi OPC polecenia odczytu z urządzenia (device). Czas jest mierzony od momentu zapisu do momentu odczytania parametru wartość. Za każdym razem w tablicy jest umieszczany zmierzony czas, po czym jest wykonywana kolejna iteracja algorytmu. W wypadku zadziałania ograniczenia czasowego *Timeout* zostanie zapisana wartość -1. Prezentacja wyników obejmuje wykres z czasami transmisji dla kolejnych cykli i histogram przedstawiający sta-

tystykę dla tych czasów. W ten sposób realizowana jest ciągła transmisja danych. W sieci GPRS użytkownik zajmuje kanał fizyczny tylko wtedy, gdy nadaje lub odbiera dane [9], więc generowany przez algorytm ruch ogranicza możliwość wyłączenia zadania transmisji z kanału radiowego.



Rys. 3. Algorytm aplikacji w Matlabie mierzącej prędkość wymiany danych z MT-101 dla transmisji ciągłej



Rys. 4. Cykl wymiany danych pomiędzy aplikacją w Matlabie, serwerem OPC i modulem MT-101 dla algorytmu z rysunku 3

Objaśnienia w tekście

Na rysunku 4 jest przedstawiony diagram czasowy wymiany danych pomiędzy Matlabem, serwerem OPC oraz modulem MT-101. Cykl zapisu jest przedstawiony pogrubionymi strzałkami przerywanymi, a odczytu ciągłymi. Aplikacja w Matlabie wysyła polecenia serwerowi OPC (strzałka od aplikacji do serwera). Po jego wykonaniu pojawia się znak zachęty w oknie komend Matlaba umożliwiający wprowadzanie kolejnych poleceń (strzałka od serwera do aplikacji). Serwer OPC wydaje odpowiednie polecenie (zapisu lub odczytu) modułowi MT-101. Na rysunku została przedstawiona transmisja ramek k i $k+1$. Ramki te można rozróżniać po tym że są związane z inną wartością parametru *wartosc*, co zabezpiecza przed błędną identyfikacją podczas odczytu.

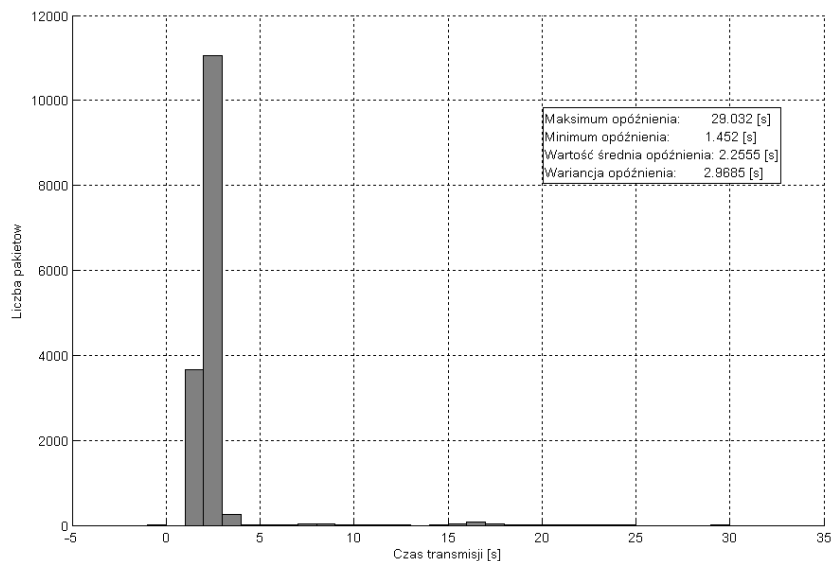
Wydanie polecenia zapisu serwerowi OPC dla ramki k trwa przez czas równy $\tau^z(k)$. Długość tego czasu zależy od komputera, na którym jest uruchomiony serwer OPC i Matlab oraz od działających w tle aplikacji. Czas ten jest w przybliżeniu stały. Jest to czas wykonania jednej instrukcji Matlab. Jak wspomniano w rozdziale 2, można go pominąć.

W trakcie trwania przedziału czasu oznaczonego jako $\tau^o(k)$ Matlab odpytuje serwer OPC o zasoby modułu MT-101, aż do momentu gdy serwer otrzyma z modułu ramkę z informacją o dotarciu ramki k . Czas ten zależy od funkcjonowania sieci GPRS. Czas mierzony przez aplikację wynosi

$$\tau^c(k) = \tau^z(k) + \tau^o(k) \quad (1)$$

Aplikacja wysyła ramkę $k+1$ bezpośrednio po zakończeniu poprzedniego cyklu zapisu/odczytu (w chwili t_{k+1}). W trakcie cyklu odczytu dla ramki $k+1$ mogą przyjść ramki związane z cyklem odczytu dla ramki k , ale zostaną one odróżnione przez zmieniającą się w każdym obiegu głównej pętli programu wartość parametru *wartosc*.

Na rysunku 5 został przedstawiony histogram czasów $\tau^c(k)$ dla $k = 1, 2, 3, \dots, 15\ 300$. Na osi poziomej są zaznaczone przedziały czasu o szerokości 1 sekundy, do jakich mogą należeć ramki. Oś pionowa oznacza liczbę ramek należących do poszczególnych przedziałów na osi poziomej.

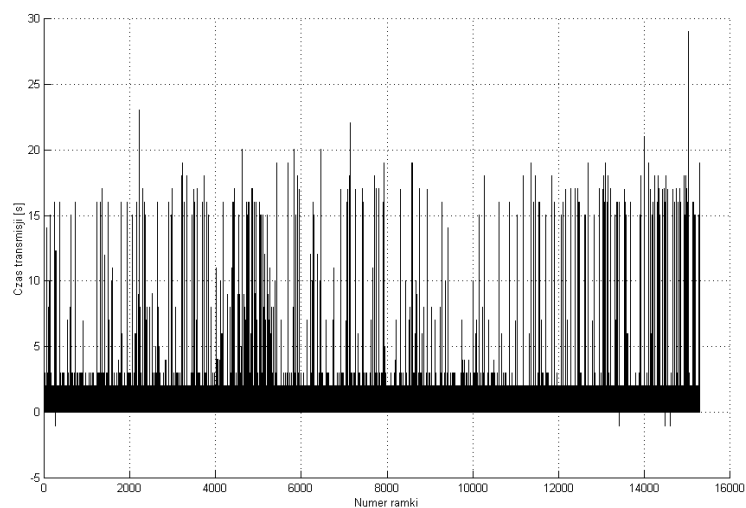


Rys. 5. Histogram czasów transmisji danych dla algorytmu z rysunku 3 (parametry: *Timeout* = 30 s, *liczba_ramek* = 15 300). Parametry (Minimum, Maksimum, Wartość średnia, Wariancja) są liczone tylko dla ramek, dla których nie zachodzi „timeout”

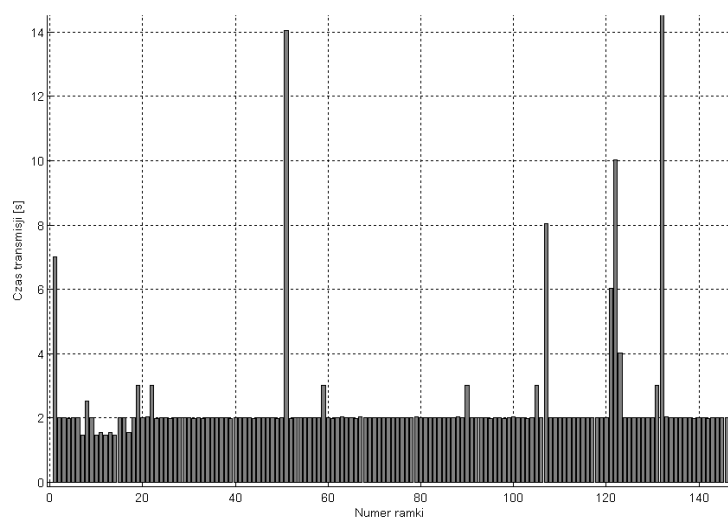
Najwięcej ramek (11050) należy do przedziału $2 \div 3$ s co jest zgodne z zapewnieniami producenta modułu telemetrycznego [1]. Następny w kolejności przedział ($1 \div 2$ s) ma 3660 ramek. Jest niewielka liczba ramek, które nie dotarły w wyznaczonym czasie (wartość -1 na histogramie) oraz tych, dla których czas $\tau^c(k)$ jest większy od 4 s.

Na rysunkach 6, 7 są przedstawione diagramy czasowe dla przeprowadzonego eksperymentu. Na osi poziomej są kolejne numery ramek. Na osi pionowej są umieszczone czasy $\tau^c(k)$.

Rysunek 7 pokazuje, że dla pierwszej ramki występuje duże opóźnienie w stosunku do ramek następnych. Ten efekt pierwszej ramki jest spowodowany tym, że w sieci GPRS przydział kanału jest dokonywany tylko na czas transmisji ciągu pakietów lub ich odbioru. W chwilach pomiędzy transmisją kolejnych pakietów kanał może być używany przez inne stacje ruchome. W naszym wypadku na początku modem komputera nadrzędnego mógł czekać na przydział kanału. Następnie transmitując ramki danych jedna za drugą, utrzymał kanał na własny użytek, przez co wystąpił ciąg danych o opóźnieniu tylko około 2 s. Losowy charakter dostępu do medium transmisyjnego wprowadza jednak występujące pojedynczo lub grupowo skoki opóźnień.



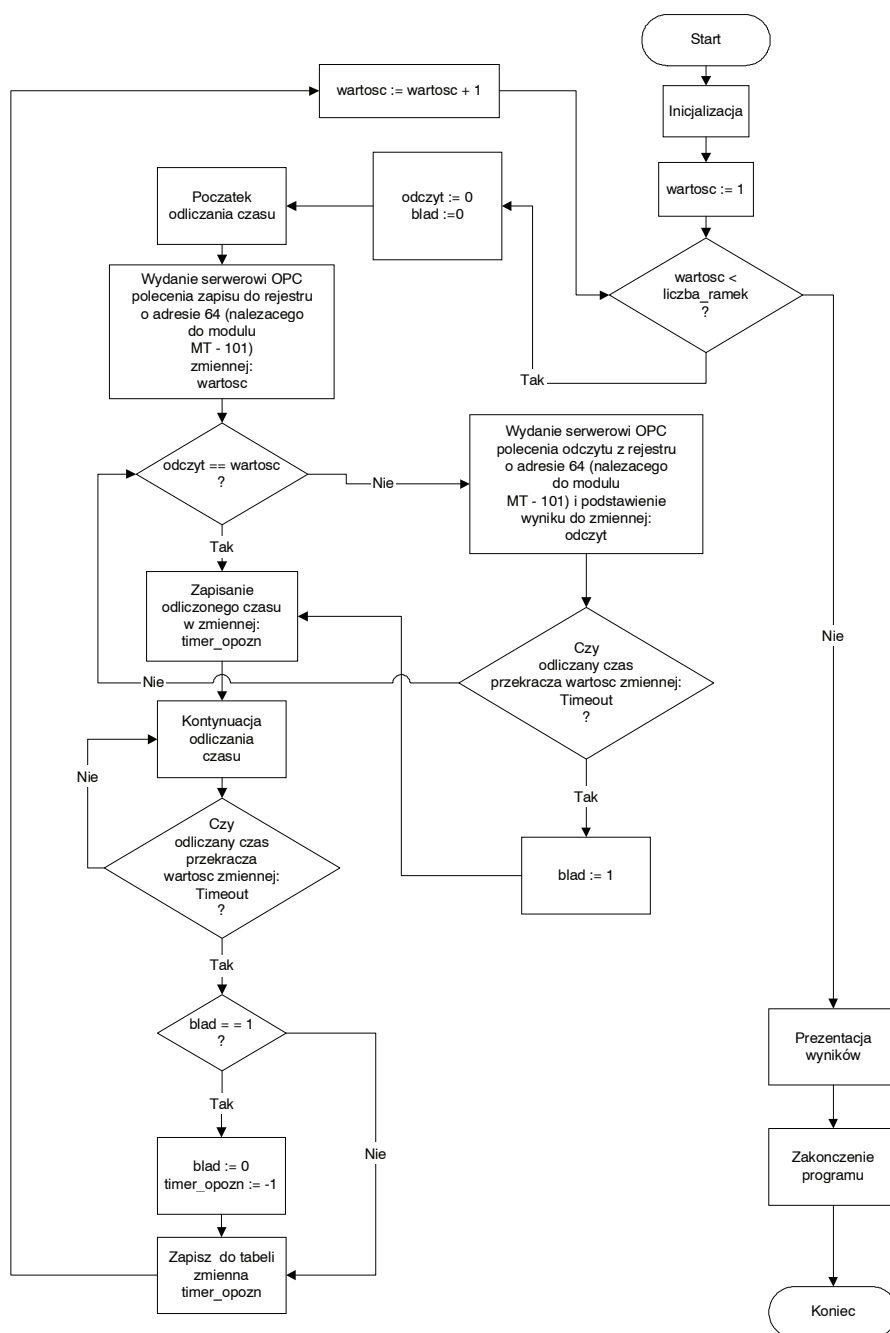
Rys. 6. Wykres czasowy pomiaru prędkości transmisji danych dla algorytmu z rysunku 3 (parametry: *Timeout* = 30 s, *liczba_ramek* = 15 300)



Rys. 7. Powiększenie fragmentu rysunku 6

4. Pomiar prędkości ramek wysyłanych z zadaniem interwałem czasowym

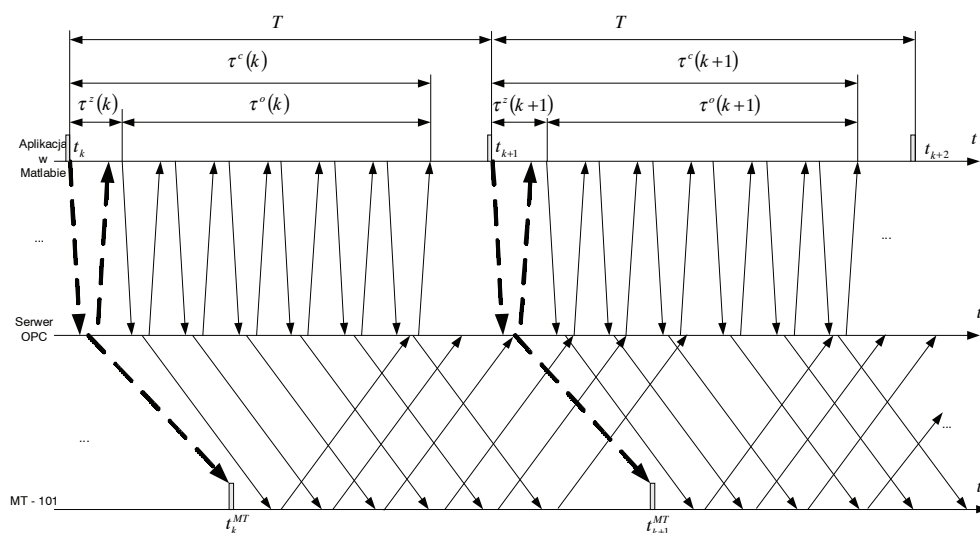
Na rysunku 8 jest przedstawiony sposób działania programu mierzącego prędkość wymiany danych pomiędzy modułem MT-101 a komputerem nadrzędnym dla transmisji danych z zadaniem interwałem czasowym.



Rys. 8. Algorytm aplikacji w Matlabie mierzącej prędkość wymiany danych z MT-101 dla transmisji z interwałem czasowym

Parametrem wejściowym tej procedury jest maksymalny czas oczekiwania (w sekundach) i jednocześnie interwał wysyłania ramek oznaczony jako *Timeout* (w naszym wypadku wynosi 5 s) oraz liczba cykli zapisu/odczytu oznaczona jako *liczba_ramek* (w naszym wypadku wynosi 1200). Inicjalizacja przebiega w sposób taki, jak opisany w rozdziale 3.

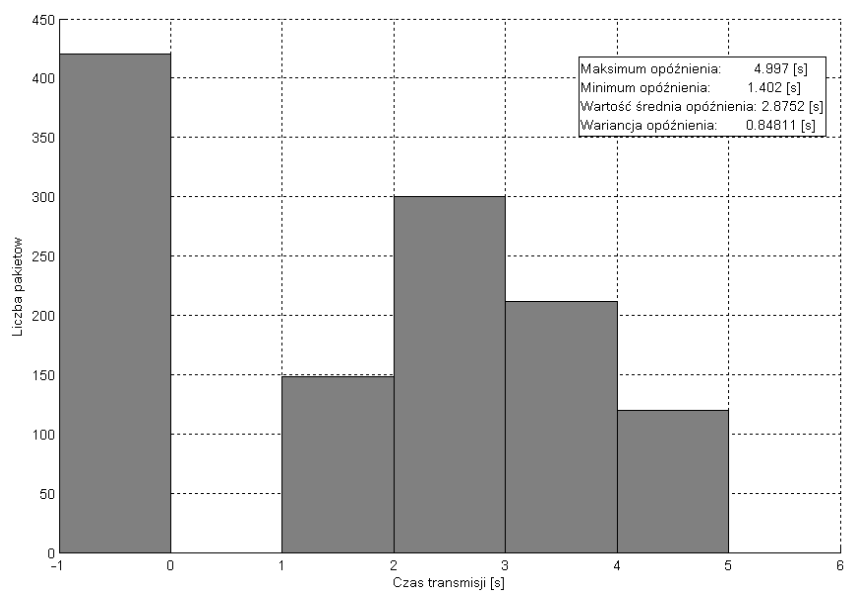
Na rysunku 9 jest graficznie przedstawiona wymiana danych pomiędzy Matlabem, serwerem OPC oraz modulem MT – 101 (podobnie jak w rozdziale 3). Interwał czasowy pomiędzy wysyłaniem kolejnych ramek jest stały (ma wartość równą *Timeout*) i jest oznaczony jako T . Czas cyklu zapis/odczyt $\tau^c(k)$ jest mierzony podobnie jak w rozdziale 3 i spełnia zależność (1).



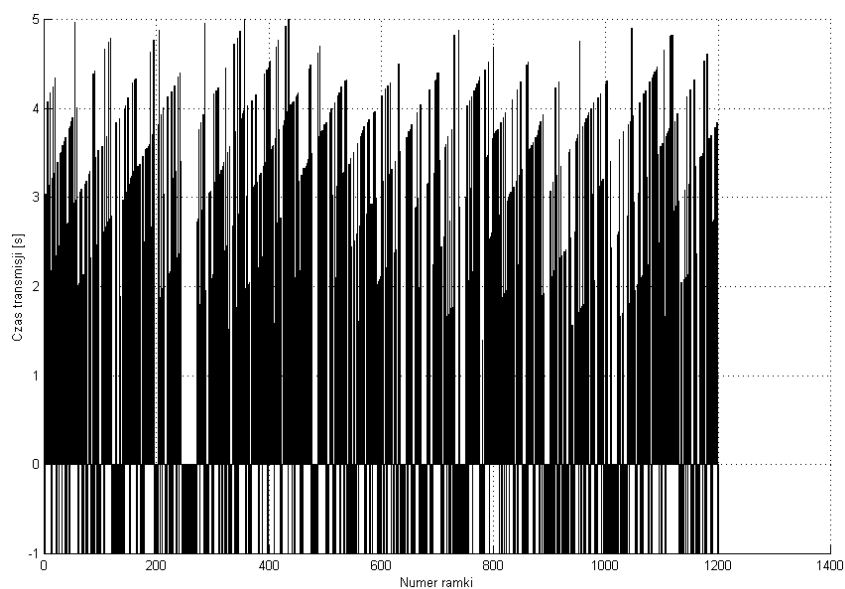
Rys. 9. Cykl wymiany danych pomiędzy aplikacją w Matlabie, serwerem OPC i modulem MT-101 dla algorytmu z rysunku 8

Na rysunku 10 został przedstawiony histogram z czasami $\tau^c(k)$ dla $k = 1, 2, 3, \dots, 1200$. Tym razem sytuacja jest gorsza. Najwięcej ramek przekracza wartość opóźnienia 5 s, a więc zostaje odrzuconych. Z pozostałych dominują ramki z przedziału 2–3 s, ale nie stanowią one zdecydowanej większości.

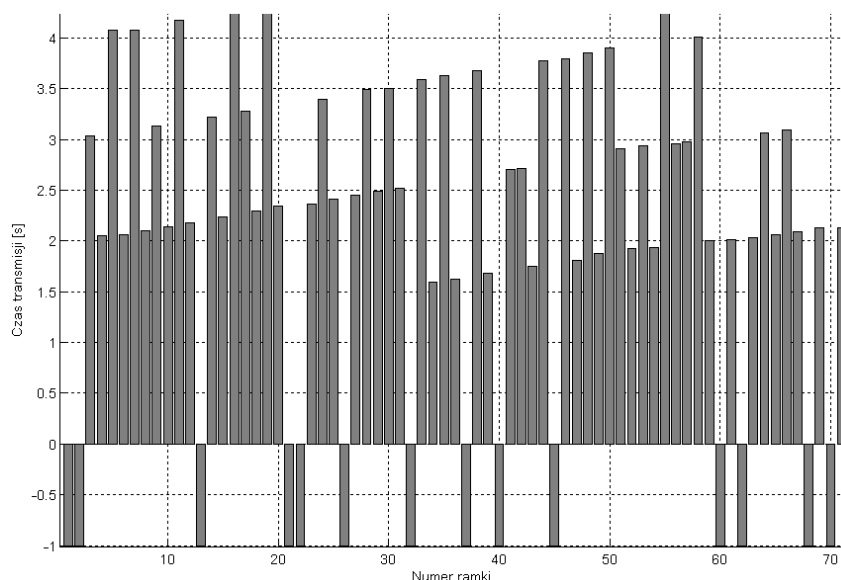
Na rysunkach 11 oraz 12 są przedstawione diagramy czasowe dla naszego eksperymentu. Na rysunku 12 efekt pierwszej ramki zaznaczył się odrzuceniem dwóch kolejnych ramek. Obserwując wykresy, widać częstsze niż poprzednio i zarazem dłuższe serie odrzuconych ramek. Może to wynikać z faktu, że przerwa pomiędzy kolejnymi cyklami zapisu/odczytu (niezbędna dla zachowania stałego interwału zapisu równego *Timeout*) sprawia, że potrzebna jest kolejne żądanie przydziału kanału transmisji GPRS.



Rys. 10. Histogram czasów transmisji danych dla algorytmu z rysunku 9 (parametry: *Timeout* = 5 s, *liczba_ramek* = 1200). Parametry (Minimum, Maksimum, Wartość średnia, Wariancja) są liczone tylko dla ramek, dla których nie zachodzi *timeout*



Rys. 11. Wykres czasowy pomiaru prędkości transmisji danych dla algorytmu z rysunku 9 (parametry: *Timeout* = 5 s, *liczba_ramek* = 1200)



Rys. 12. Powiększenie fragmentu rysunku 11

5. Wnioski

Opracowano metodę pomiaru prędkości transmisji danych w rozproszonym układzie sterowania, wykorzystującym technologię GPRS. W wyniku przeprowadzonych pomiarów prędkości obiegu ramki GPRS pokazano, że najkorzystniejsze parametry transmisyjne z punktu widzenia zastosowań w sterowaniu i zdalnych pomiarach obiektów przemysłowych można uzyskać przy transmisji ciągłej. Wprowadzane przez komputer nadrzędny odstępy czasowe w transmisji mogą pogorszyć własności dynamiczne systemu sterowania lub monitorowania. Wynika stąd ważny wniosek dotyczący synchronizacji w układzie sterowania, wykorzystującym bezprzewodową technologię GPRS: należy stosować ciągłą transmisję danych (opisaną w rozdziale 3). Eksperymenty wykazały, że można wtedy realizować sterowanie rozproszone obiektami dynamicznymi odpornymi na opóźnienia do 5 s [3, 8]. Obiekt taki musi posiadać własność globalnej asymptotycznej stabilności, tak aby brak sterowania wynikły na skutek opóźnienia lub odrzucenia pakietów nie powodował utraty stabilności. Przykładem takiego systemu jest układ zbiorników. Dla tego obiektu udało się z sukcesem przeprowadzić eksperymenty sterowania rozproszonego, co zostało opisane w pracy [8].

Literatura

- [1] AB-MICRO 2004: *Moduł telemetryczny MT-101 – instrukcja obsługi, wersja 1.3*. AB-MICRO, Warszawa, www.abmicro.pl
- [2] Grega W.: *Sterowanie cyfrowe w systemach skupionych i rozproszonych*. Kraków, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH 2004

- [3] Grega W., Rosół M.: *Distributed Control Using GPRS Wireless Network*. Proc. of the 11th IEEE International Conference on MMAR, Institute of Control Engineering Technical University of Szczecin, Międzyzdroje 2005
- [4] Mathiens M., Thonet G., Aakvaag N.: *Wireless Ad-Hoc Networks for Industrial Automation: Current Trends and Future Prospects*. Proc. of 16th IFAC World Congress, IFAC, Prague 2005
- [5] Michałek T.: *Radiomodemy Satel.* Pomiary Automatyka Robotyka, nr 9, 2003, 36–38
- [6] NORDYN 2005: <http://www.nordyn.com/>
- [7] OPC 2005: <http://www.opcfoundation.org/>
- [8] Simicz A.: *Technologia GPRS w monitorowaniu procesów*. Praca magisterska (opiekun – prof. dr hab. inż. Wojciech Grega), Kraków, Katedra Automatyki AGH 2005
- [9] Wesołowski K.: *Systemy radiokomunikacji ruchomej*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2003