

Automatyka rozproszona

Wojciech Grega

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki

Streszczenie: Współczesne systemy sterowania rzadko są projektowane jako układy autonomiczne. Zazwyczaj są one połączone przewodowymi lub bezprzewodowymi kanałami transmisji danych, wymieniając dane z innymi urządzeniami automatyki i tworząc systemy sterowania rozproszonego. Od strony teoretycznej modele rozproszonych układów mogą mieć złożoną dynamikę, co jest związane z opóźnieniami transmisji danych lub nawet utratą części danych. Zagadnienia te stały się przedmiotem zainteresowania badaczy oraz praktyków z przemysłu, tworząc nową, interdyscyplinarną dziedzinę automatyki. W pracy omówiono projekty badawcze i dydaktyczne dotyczące takich rozwiązań, realizowane w Katedrze Automatyki AGH w Krakowie. Przedstawiono przykład odpornego algorytmu sterowania rozproszonego, wykorzystującego bufor dla kompensacji opóźnień wnoszonych przez rozproszoną konfigurację.

Słowa kluczowe: sterowanie rozproszone, układy odporne, stabilność, protokoły transmisji, czas rzeczywisty

1. Wstęp

Przemysłowe układy sterowania i monitorowania rzadko występują jako samodzielne jednostki sterujące. Zazwyczaj są one połączone przewodowymi lub bezprzewodowymi kanałami transmisji danych, wymieniając w czasie rzeczywistym dane z innymi urządzeniami automatyki i systemami zarządzania, tworząc układy sterowania rozproszonego, nazywane czasem „automatyką rozproszoną”.

Zastosowanie nowoczesnych technologii teleinformatycznych umożliwia wydajne przesyłanie informacji o pracy urządzeń automatyki nie tylko w skali pojedynczych obiektów czy grup obiektów, ale w skali firmy, miasta, lub zgoła w skali całego globu. Pojawiły się nowe pojęcia, jak „telemonitoring”, „teleserowanie” i „e-przedsiębiorstwo”. Odzwierciedlają one tendencje do integracji rozproszonych terytorialnie i różnych funkcjonalnie systemów automatyki, zarządzania i planowania produkcji w jeden spójny system, o swobodnym przepływie informacji między jego poszczególnymi komponentami [1, 2]. Układy rozproszone są szczególnie predysponowane dla obiektów o dużym rozłożeniu terytorialnym, takich jak np. systemy dystrybucji energii elektrycznej i ciepłej [3].

Rozwiązania automatyki rozproszonej charakteryzują się licznymi zaletami, z których najważniejsze to:

- redukcja błędów przetwarzania sygnałów pomiarowych, dzięki przekształceniu ich na wysoce odporną na zakłócenia postać cyfrową w pobliżu miejsca pomiaru,
- podniesiona niezawodność wynikająca z podziału funkcji na wiele lokalnych, niezależnych węzłów,
- niezawodność i bezpieczeństwo przesyłu informacji, uzyskane przez stosowanie specjalnych metod transmisji cyfrowej, z mechanizmami kodowania i kontroli integralności danych,

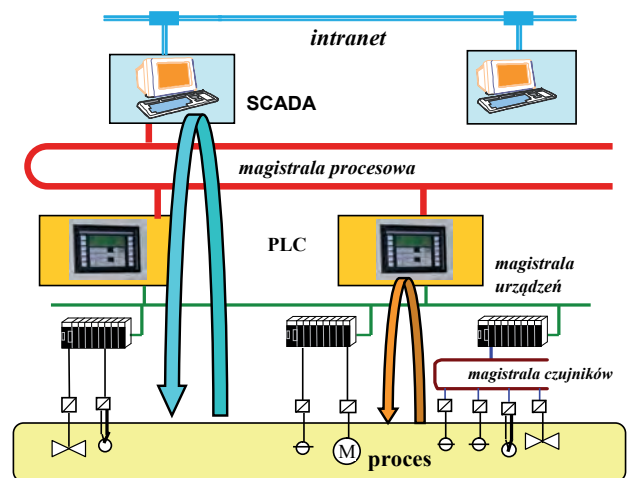
- ułatwiona obsługa systemu, usuwanie awarii oraz łatwe tworzenie konfiguracji nadmiarowych,
- skalowalność systemu oraz możliwość elastycznego kształtowania funkcji systemu, np. przez wykorzystanie wielofunkcyjnych urządzeń pomiarowych,
- możliwość integracji z innymi systemami informatycznymi, w tym z nadrzędnymi systemami przeznaczonymi do celów zarządzania.

Rozproszone systemy automatyki rozpowszechniły się także dzięki masowemu rozwojowi technologii systemów wbudowanych (ang. *embedded*), wyposażonych w interfejsy komunikacyjne. Przykładowo [4], elektronika pokładowa samochodu osobowego Volkswagen Phaeton jest wspierana przez 61 systemów wbudowanych, z których 35 jest połączonych w 3 sieci standardu CAN, wymieniając w czasie rzeczywistym około 2500 sygnałów i komunikatów.

W automatyce przemysłowej kluczowymi elementami, z których konfiguruje się rozproszone układy sterowania (rys. 1) są [5]:

- węzły pomiarowo-sterujące wyposażone w lokalną inteligencję,
- kanały transmisji danych wspierające poziomy i pionowy (w przyjętej strukturze układu sterowania) przepływ danych,
- systemy monitorowania SCADA,
- nadrzędne systemy sterowania.

Magistrala przesyłająca dane jest istotnym składnikiem systemu rozproszonego, a często nawet składnikiem krytycznym, gdyż jej niekorzystne właściwości mogą decydować o stabilności układu sterowania. Stąd konieczność dokładnej analizy i modelowania właściwości dynamicznych tego komponentu układu sterowania. Wpływ transmisji danych



Rys. 1. Hierarchiczna konfiguracja przemysłowego układu sterowania

Fig. 1. Multilevel structure of an industrial control system

na dynamikę rozproszonego układu sterowania jest istotnie związany z protokołami transmisji stosowanymi w danej sieci telekomunikacyjnej, a w szczególności z wykorzystanym tam tzw. modelem dostępu do kanału transmisji danych.

Obecność kanału transmisji danych w pętli sprzężenia zwrotnego może być nie tylko źródłem ograniczeń w ilości przesyłanych danych, ale także może generować opóźnienia lub nawet stać się przyczyną utraty danych. Jest to szczególnie istotne w systemach sterowania krytycznych czasowo i krytycznych ze względu na bezpieczeństwo (ang. *safety critical systems*), czyli takich, w których niewielkie naruszenia warunków przepływu danych w czasie rzeczywistym skutkują obniżeniem jakości sterowania, a nawet zagrożeniem bezpieczeństwa całego procesu. Na pewno są nimi wspomniane wcześniej elektroniczne układy sterujące w samochodzie. W pracy [4] formułuje się następujące wymagania dotyczące dopuszczalnych opóźnień dla wspomnianych rozproszonych systemów sterowania w samochodzie osobowym: systemy awaryjne, stabilizacji toru jazdy i hamowania: 100 μ s, napędy: 1 ms, systemy poprawiające komfort jazdy: 10–100 ms.

Obserwuje się dążenie do standaryzacji przemysłowych protokołów przesyłu danych, zwiększania szybkości transmisji i uniezależniania się od rodzaju nośnika (sieci bezprzewodowe). Obok specjalizowanych protokołów transmisji, jak np. ATINC629, SwiftNet, SAFEbus (lotnictwo), TCN (koleje), CAN, TT-CAN, FlexRay (motoryzacja), stosuje się rozwiązania [6, 7] standardu Ethernet spełniające wymagania czasu rzeczywistego, takie jak EtherCAT, Ethernet IP, ProfiNet (automatyka przemysłowa), czy IEC 61850 (automatyka stacji energetycznych).

Modyfikacje wprowadzane dla potrzeb sterowania w czasie rzeczywistym do protokołu Ethernet określa norma IEC (ang. *International Electrotechnical Commission*) IEC 61784-2 *Real Time Ethernet*. Definiuje ona trzy klasy rozwiązań. Klasa 1 – to Ethernet o słabych cechach czasu rzeczywistego. Opóźnienia mogą dochodzić do 100 ms, przy wysokim stopniu ich niepewności (ang. *jitter*). Klasa 2 – to Ethernet o opóźnieniach poniżej 10 ms i niskiej losowości opóźnień. Może być wykorzystywany w układach automatyki w czasie rzeczywistym. I wreszcie Klasa 3 – to Ethernet spełniający najwyższe wymagania układów sterowania, np. urządzeniami mechatronicznymi o opóźnieniach poniżej 1 ms i parametrze „jitter” poniżej 1 μ s. Interesujące jest, jakie modyfikacje protokołów są stosowane, aby osiągnąć parametry określonej klasy [8]. I tak, w Klasie 1 jedyne modyfikacje są dokonywane w warstwie aplikacji, a protokół Ethernet/TCP/UDP jest stosowany w wersji standardowej, np. Ethernet IP, ModBus/IDA. Uzyskanie parametrów Klasy 2 wymaga modyfikacji warstwy MAC przez wprowadzenie priorytetyzacji pakietów i „ominięcie” warstwy TCP/UDP/IP, np. ProfiNet RT. Wymagania Klasy 3 spełniają protokoły ProfiNet IRT i EtherCAT. Zastosowanym rozwiązaniem jest tu głębsza ingerencja w protokół Ethernet – modyfikacja sposobu zarządzania wymianą danych na magistrali oraz specjalne rozwiązania sprzętu sieciowego.

Wpływ transmisji danych na dynamikę rozproszonego układu sterowania (traktowany jako pewnego rodzaju komplikacja w strukturze modelu) można identyfikować, a następnie formułować zadania uodpornienia rozproszonego układu automatyki na tego typu zjawiska i to nie tylko przez

modyfikacje protokołów transmisji, ale także przez doskonalenie algorytmów sterowania. To ostatnie podejście wynika z obserwacji, iż występujący przejściowy deficyt informacji o stanie procesu, spowodowany niedoskonałościami kanału transmisji danych, nie dyskwalifikuje rozproszonego systemu sterowania, a tylko obniża jakość sterowania. A jakość tę można w znacznym zakresie przywrócić przez właściwy wybór i strojenie algorytmu sterowania.

Algorytmiczna kompensacja efektów wnoszonych przez sieć stała się w ostatnich latach nowym wyzwaniem dla automatyki i teorii sterowania. Przykładowo, w materiałach prestiżowej *American Control Conference 2008* w Seattle można się było doliczyć prawie 30 publikacji naukowych dotyczących tej tematyki.

Temat ten jest od ponad 10 lat przedmiotem badań naukowych i projektów badawczych realizowanych w Katedrze Automatyki AGH w Krakowie. Wyniki publikowano w monografiach lub w rozdziałach w monografiach [9–11] oraz w ponad pięćdziesięciu publikacjach naukowych. Uzyskano krajowe granty badawcze wspierające realizację tej tematyki [12], oraz udział w międzynarodowych projektach [13]. Prowadzone są prace o charakterze aplikacji przemysłowych, wykorzystujące wyniki tych badań [14]. Zrealizowano pracę doktorską [15] oraz liczne prace magisterskie.

Wiadomo, że poprawa jakości sterowania w systemie rozproszonym może nastąpić przez [10]:

- zwiększanie przepustowości kanałów transmisji danych lub/i ograniczenie przesyłu danych,
- poprawę determinizmu protokołu transmisyjnego,
- właściwy dobór okresu próbkowania i sterowania,
- algorytmiczną kompensację efektów wnoszonych przez sieć.

We wspomnianych wcześniej pracach zajęto się dwoma ostatnimi zagadnieniami, a w zakresie kanałów transmisji danych ograniczono się do analizy i modelowania ich właściwości. Przyjęto, że podstawowym problemem zamkniętego układu sterowania rozproszonego jest zachowanie stabilności z odpowiednim zapasem. Kolejnym rozważanym problemem było uzyskanie żądanej jakości sterowania, zgodnie ze sformułowanymi kryteriami [8].

W metodach formalnych dla analizy i syntezy rozproszonego układu sterowania wykorzystuje się zarówno dyskretne, jak i mieszane (hybrydowe) modele procesu i układu sterowania. Wybór między modelem z czasem ciągłym a dyskretnym sprowadza się do rozstrzygnięcia, czy efekt przesyłania danych pomiarowych i sterujących, jako oddzielnych pakietów, ma wpływ na jakość działania układu sterowania?

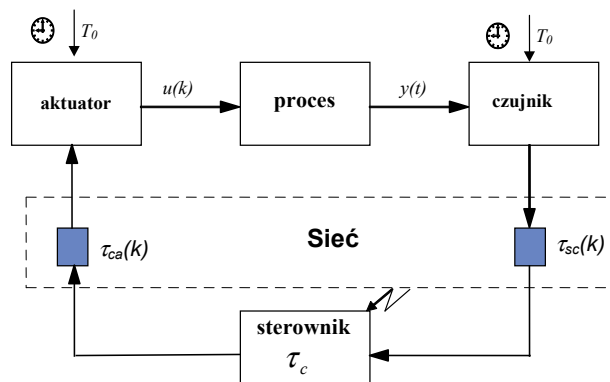
Dalsze założenia wstępne zazwyczaj sprowadzają się do odpowiedzi na pytanie, czy opóźnienia generowane przez kanał transmisji danych należy traktować jako stałe, zmienne w czasie, czy może tylko jako parametry niepewne, czyli szacowane w określonych granicach? Ogólna odpowiedź w tym przypadku jest następująca: zależy to w pierwszej kolejności od rodzaju stosowanego protokołu transmisji, a w dalszej – od relacji między dynamiką sterowanego procesu a obserwowaną szybkością zmian opóźnień [16]. Na ten ostatni parametr możemy wpływać, np. przez zastosowanie odpowiednich metod buforowania sygnału w pętli sprzężenia zwrotnego.

W pracach prowadzonych w Katedrze Automatyki wykorzystywano dyskretny model procesu i dyskretny model

transmisji sygnału pomiarowego i/lub sterującego (rozszerzanie przestrzeni stanów [10]), a także asynchroniczny model system dynamicznego [9]. Nawiązywano do rezultatów rozwijanej od lat teorii układów z opóźnieniem oraz metod dynamicznych systemów odpornych [11, 16]. Podstawową właściwość rozproszonych układów sterowania – stabilność, najczęściej analizowano z wykorzystaniem odpowiednich wersji funkcji Lapunowa. Dla odtwarzania utraconych w sieci danych wykorzystywano obserwatory [15], a dla poprawy determinizmu w rozproszonej pętli sprzężenia zwrotnego – bufor o stałej lub zmiennej długości [17, 11]. Wolnozmiennne opóźnienia kompensowano z użyciem odpornego predyktora Smitha [18].

2. Model układu sterowania rozproszonego

Podstawowe komponenty tworzące przykładową strukturę modelu rozproszonego układu sterowania przedstawiono na rys. 2. Jest to klasyczna struktura układu ze sprzężeniem zwrotnym, zawierająca model obiektu sterowania – reprezentujący proces, dla którego realizujemy określone zadanie sterowania. Czujnik jest aktywowany zegarem, który odczytuje wartości określonych zmiennych procesu, przetwarza je w wartość cyfrową i przesyła do regulatora, który aktywowany tym zdarzeniem odbiera aktualną wartość sterowania, wylicza sterowanie i przesyła do urządzenia wykonawczego



Rys. 2. Podstawowy model rozproszonego układu sterowania
 Fig. 2. Basic model of distributed control system

(aktuatora). Ten przetwarza otrzymane dane cyfrowe na odpowiadające im wartości analogowe, aktualizuje sterowanie procesu i podtrzymuje je do czasu uzyskania kolejnego sterowania. Poszczególne komponenty mogą być modelowane równaniami z czasem ciągłym, dyskretnym lub mieszanymi (hybrydowymi). Odpowiednie sygnały są oznaczone na rys. 2 jako funkcje „t” (czas ciągły) lub „k” (czas dyskretny).

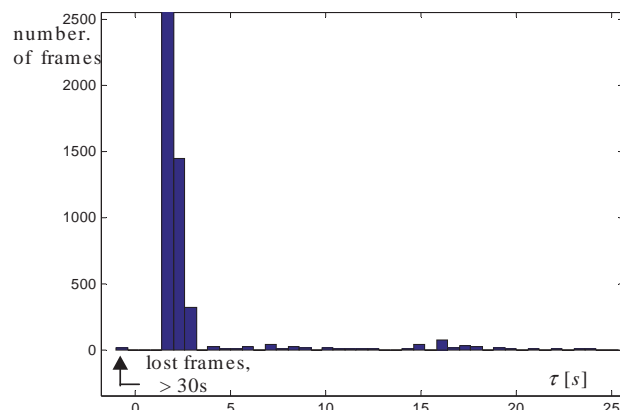
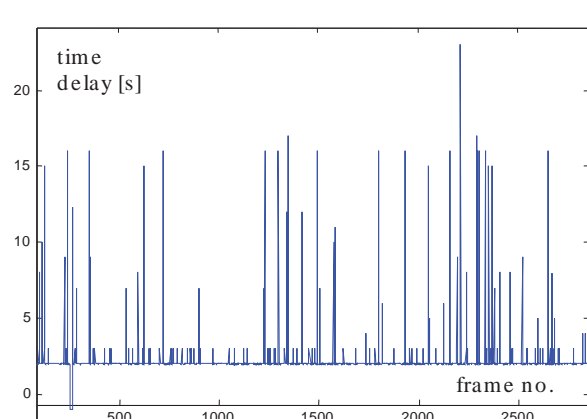
Kanał transmisji danych („sieć” na rys. 2) jest nowym i zazwyczaj komplikującym składnikiem tej struktury. Może ona wprowadzać opóźnienia (τ_{ca} , τ_{cs} – rys. 2), które mogą być klasyfikowane jako zdeterminowane, losowe lub niepewne. Charakter opóźnień transmisji sygnału zależy od rodzaju wykorzystywanej sieci transmisji danych, a w szczególności od stosowanej w tej sieci metody kontroli dostępu do medium komunikacyjnego [9]. W szczególności, sieci typu token-bus, token-ring, czy inne sieci przemysłowe o cyklicznej wymianie danych (np. standard WorldFIP) są klasyfikowane jako sieci deterministyczne, czyli o opóźnieniu stałym. Rys. 3 [8] przedstawia przykładową charakterystykę losowych opóźnień wnoszonych przez bezprzewodową sieć transmisji danych.

Przy transmisji danych możliwe są dodatkowe komplikacje, jak np. utrata pakietów, co można interpretować jako okresowe przejście ze sterowania w układzie zamkniętym do sterowania otwartego.

3. Sterowanie przez sieć: przykład uodpornienia rozproszonego układu sterowania

Realizacja algorytmicznej kompensacji efektów wnoszonych przez sieć, czyli zaprojektowanie odpornego algorytmu sterowania rozproszonego, wymaga następujących działań:

- wyboru modelu dynamiki rozproszonego układu sterowania, identyfikacji parametrów sterowanego procesu i sieci transmisji danych,
- doboru klasy algorytmów sterowania i ich ewentualnych rozszerzeń, umożliwiających kompensację wpływu połączenia przez sieć,
- oszacowania maksymalnych opóźnień w dostarczeniu informacji o stanie procesu, udziału utraconych danych, przy których rozproszony układ sterowania zachowuje jeszcze stabilność z odpowiednim zapasem,



Rys. 3. Przykładowa charakterystyka opóźnień wnoszonych przez sieć bezprzewodową
 Fig. 3. Example: wireless network data transfer times and histogram of delays

– symulacyjnego testowania wpływu efektów wnoszonych przez sieć na jakość sterowania.

Algorytmy sterowania, stosowne dla uodpornienia rozproszonych aplikacji, można sklasyfikować następująco [8]:

Algorytmy pasywne. Nie zawierają dodatkowych modyfikacji lub rozszerzeń uwzględniających rozproszony charakter aplikacji. W tym przypadku projektuje się system sterowania, pomijając jego rozproszony charakter, a następnie analizuje się wpływ rozproszenia w różnych aspektach (opóźnienia, zagubienia pakietów), próbując uzyskać odpowiedź na pytanie: ile tego typu zakłóceń system sterowania może tolerować i czy przez strojenie parametrów algorytmu sterowania można układ uodpornić?

Algorytmy aktywne. Zawierają dodatkowe modyfikacje lub rozszerzenia uwzględniające rozproszony charakter aplikacji. Wśród nich można wymienić algorytmy:

- ograniczające ruch w sieci (np. grupujące próbki) [15, 19],
- poprawiające determinizm (np. przez buforowanie) [20],
- odtwarzające opóźnione lub stracone dane na podstawie modeli procesu (np. MRC, obserwatory stanu) [21],

Wyczerpujący przegląd takich algorytmów zawarto w pracy [22].

Jednym ze sposobów poprawy jakości sterowania w układzie rozproszonym jest jego rozbudowa o niekonwencjonalne komponenty. Jednym z takich komponentów jest bufor. Wykorzystana koncepcja polega na „filtracji”, w wyniku której występujące w pętli sprzężenia zwrotnego opóźnienia szybkozmienne zostają zastąpione przez opóźnienia wolnozmienne. A to pozwala zastosować klasyczne metody dla ich kompensacji. Poniżej przedstawiono przykład prostego algorytmu wykorzystującego bufor.

Rozważmy model liniowy ze zmiennym opóźnieniem, gdzie τ reprezentuje skumulowane opóźnienie występujące w pętli sprzężenia zwrotnego: $\tau = \tau^{sc} + \tau^a + \tau^c$.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau(t)) \quad (1)$$

gdzie: $\tau(t)$ – nieujemna i ograniczona funkcja na $[0, +\infty)$, $0 \leq \tau_{\min} \leq \tau(t) \leq \tau_{\max} < \infty$.

Ten nieskończenie wymiarowy (ze względu na opóźnienie) model jest często aproksymowany przez model z czasem dyskretnym.

W tym celu należy przyjąć, że:

- dane pomiarowe i sterujące są przesyłane jako oddzielne, kompletne pakiety,
- transmisja po sieci nie wprowadza błędów sygnału pomiarowego i sterującego,
- czujniki i aktuator są wyzwalone synchronizowanymi zegarami, a sterownik zdarzeniami,
- pakiety z danymi nie mogą być zagubione, odrzucane i nie może być zmieniona kolejność ich dostarczenia,
- dynamika procesu jest sterowalna.

Podstawą projektowania regulatora może być odpowiadający modelowi (1) model z czasem dyskretnym, który dla zmiennego w czasie opóźnienia przyjmuje postać

$$x[k+1] = \Phi_0 x[k] + \Gamma_1 u[k-q-1] + \Gamma_0 u[k-q]$$

gdzie opóźnienie jest reprezentowane jako

$$\tau = qT_0 + \gamma, \quad q \geq 0, \quad \Gamma_1 = \int_{T_0-\gamma}^{T_0} e^{As} B ds, \quad \Gamma_0 = \int_0^{T_0-\gamma} e^{As} B ds, \quad \Phi_0 = e^{AT_0}$$

Dla zwięzłości opisu przyjęto $x(k)$ w miejsce $x(kT_0)$, gdzie T_0 – okres cyklu w pętli sterowania, a sterowanie zmienia się wyłącznie w chwilach $(kT_0 + \tau)$, q – liczba całkowita.

Model ten jest skończenie wymiarowym modelem dyskretnym, który może być reprezentowany w rozszerzonej przestrzeni stanów [9] po wprowadzeniu nowych zmiennych stanu

$$\begin{aligned} z_1[k] &= u[k-q-1] \\ z_2[k] &= u[k-q] \\ &\vdots \\ z_{q+1}[k] &= u[k-1] \end{aligned}$$

Gdy opóźnienie jest ograniczone $\tau_{\max} = T_0$, model przyjmuje postać ($\tau = \gamma$)

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_0 & \Gamma_1(\tau) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_0(\tau) \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (2)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}$$

A zatem jest to model o zmiennych parametrach. Jest znanym faktem, że dla takiego modelu pozostawanie w każdym kroku k wartości własnych w okręgu jednostkowym jest warunkiem koniecznym stabilności, lecz nie jest wystarczającym.

Zastosowanie jednokrokowego bufora w aktuatorze prowadzi do modelu już stacjonarnego, o postaci

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z_1(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_0 & \Gamma_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3)$$

Działanie tego bufora polega na tym, że pakiet z danymi jest dostarczany przez sieć do aktuatora tak szybko, jak to jest możliwe, ale jest zatrzymywany w buforze do najbliższego początku cyklu sterowania. Jeśli tylko jest spełnione ograniczenie ($0 \leq \tau(t) \leq T_0$), to układ pracuje ze stałym opóźnieniem równym $\tau_{\max} = T_0$.

Przy prawidłowym działaniu bufora opóźnienia obserwowane przez regulator są stałe i wynoszą T_0 . Niepewność czasu transmisji danych jest usunięta. Przy stałych opóźnieniach obserwowanych przez sterownik mogą zostać zastosowane klasyczne metody ich kompensacji, np. predyktor Smitha [23].

Stosując liniowe sprzężenie zwrotne od stanu:

$$u(k) = -\begin{bmatrix} K_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z_1(k) \end{bmatrix}, \quad u(k) \in R^1 \quad (4)$$

Otrzymujemy model układu sterowania

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_0 - \Gamma_0(\tau)K & \Gamma_1(\tau) \\ -K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Gdy warunek $0 \leq \tau(t) \leq T_0$ nie jest spełniony, można zastosować powiększony bufor, co dla przypadku $\tau_{\max} = 2T_0$, prowadzi do modelu ($q = 1$)

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z_1(k+1) \\ z_2(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \Phi_0 & \Gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -K_x & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\Phi_2} \begin{bmatrix} x(k) \\ z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Gdy opóźnienie $\tau(k)$ zmienia się w przedziale $[0, 2T_0]$, jest uzasadnione zastosowanie przełączania między buforami o długości T_0 i $2T_0$.

Zjawisko takie może być modelowane jako asynchroniczny system dynamiczny [24]. W tym celu model (5) w wersji z buforem jednokrokovym może zostać zapisany w równoważnej postaci

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z_1(k+1) \\ z_2(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \Phi_0 & 0 & \Gamma_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -K_x & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\Phi_1} \begin{bmatrix} x(k) \\ z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Warunki stabilności modelu (6), (7) precyzuje następujące twierdzenie [25].

Jeżeli dla modelu rozproszonego systemu z liniowym sprzężeniem od stanu

$$w((k+1)) = \Phi_{s(k)} w(k), \quad w(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix}, \quad s(k) = (1,2) \quad (8)$$

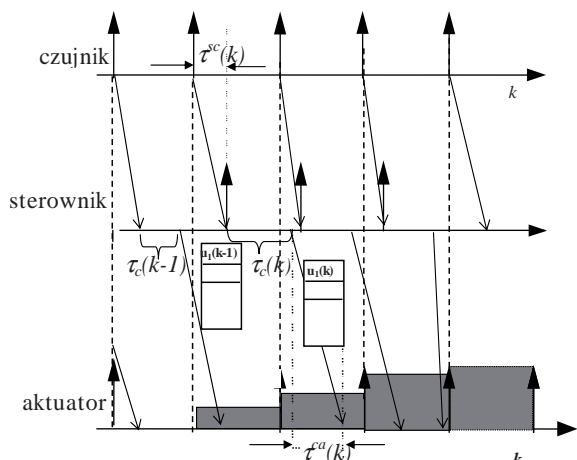
dla określonej wartości współczynnika r udziału modeli (6), (7) w modelu (8) istnieje funkcja Lapunowa

$$V(w(k)) = w^T(k) P w(k)$$

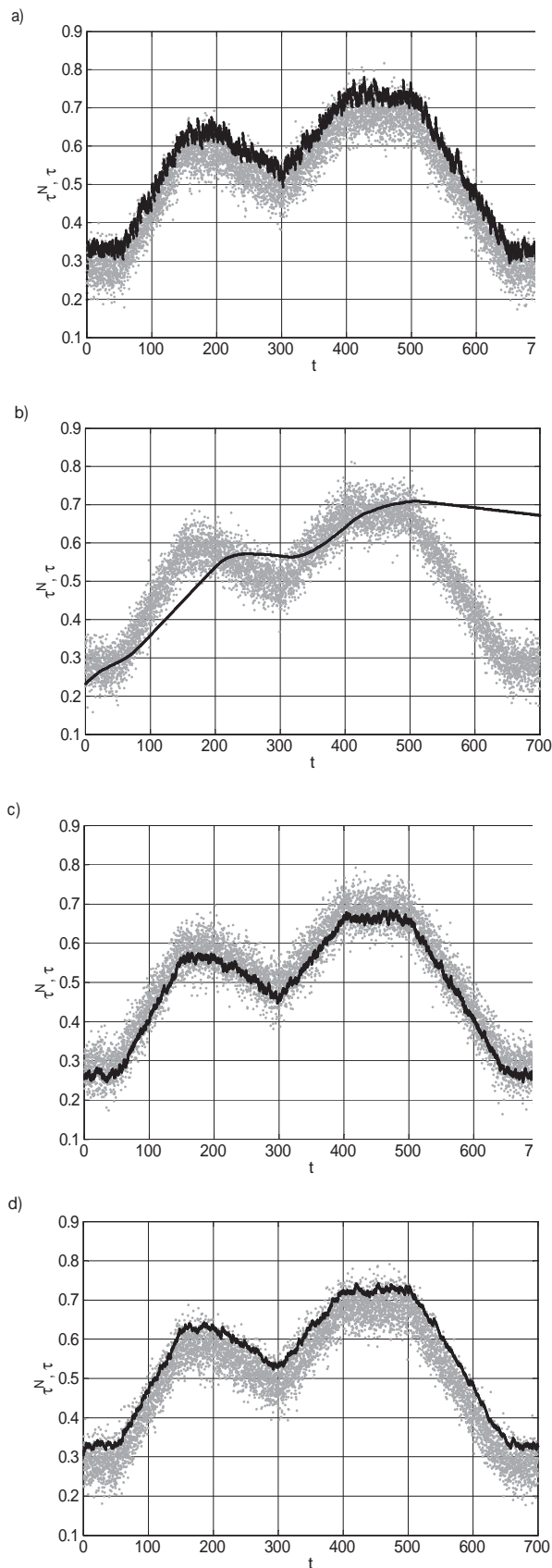
i stałe α_1, α_2 takie, że jest spełnione

$$\begin{aligned} \alpha_1^r \alpha_2^{1-r} &> 1 \\ \Phi_1^T P \Phi_1 &\leq \alpha_1^{-2} P, \\ \Phi_2^T P \Phi_2 &\leq \alpha_2^{-2} P \end{aligned} \quad (9)$$

to system jest wykładniczo stabilny.



Rys. 4. Diagram czasowy działania bufora o długości $\tau_B = 2T_0$
 Fig. 4. Time diagram of buffering for $\tau_B = 2T_0$



Rys. 5. Przykład działania bufora adaptacyjnego [15]: a) $a = 0,2$; $p = 0,9$, b) $a = 0,002$; $p = 0,9$, c) $a = 0,05$; $p = 0,3$, d) $a = 0,05$; $p = 0,9$ (kolor czarny – sygnał na wyjściu z bufora, szary – sygnał na wejściu bufora)

Fig. 5. Example of adaptive filter operation [15]: a) $a = 0,2$; $p = 0,9$, b) $a = 0,002$; $p = 0,9$, c) $a = 0,05$; $p = 0,3$, d) $a = 0,05$; $p = 0,9$ (black – after buffer, grey – before buffer)

Współczynnik udziału r reprezentuje udział macierzy (Φ_1, Φ_2) w modelu (8). Po przyjęciu wartości tego współczynnika powyższy układ nierówności rozwiązuje się jako problem liniowych nierówności macierzowych (LMI).

Łatwo zauważyć, że twierdzenie to nie wymaga, aby system (8) był stabilny dla każdej funkcji $\Phi_{s(k)}$, natomiast gwarantował stabilność w sensie „średnim”. Na rys. 4 przedstawiono diagram czasowy działania bufora.

Naturalnym rozwinięciem koncepcji bufora o przełączanej długości jest zastosowanie bufora w pełni adaptacyjnego [15, 17]. Należy przy tym założyć, że dla rozważanego układu sterowania kolejność dostarczanych przez sieć pakietów nie może zostać zmieniona, a pakiety nie mogą być zgubione.

Początkowa długość bufora jest przyjęta jako T_0 . Adaptacja długości bufora następuje według formuły

$$\tau_B(k) = T_0 + \alpha T_0(p - \phi(k))$$

gdzie: α – parametr adaptacji $\alpha > 0$, p – założony udział pakietów dostarczonych do bufora punktualnie (to znaczy nie później, niż po upływie odcinka czasu T_0 , $\tau_B(k)$), $0 < p < 1$.

$$\phi(j) = \begin{cases} 1 & \text{gdy pakiet został dostarczony punktualnie} \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases}$$

Po $(k+1)$ krokach długość bufora wynosi

$$\tau_B(k+1) = T_0 + \alpha T_0 \sum_{j=0}^k (p - \phi(j))$$

Taki model bufora realizuje rodzaj filtracji szybkochmiennych składowych opóźnień, co dobrze ilustrują wyniki symulacji działania takiego bufora (rys. 5).

Projektowanie algorytmu sterowania wykorzystującego buforowanie wymaga:

- doboru prawidłowej pojemności bufora dla założonego rozkładu opóźnień,
- zaprojektowanie algorytmu sterowania, który efektywnie wykorzysta bardziej deterministyczne przebiegi sygnału na wyjściu z bufora.

Dla układu sterowania rozproszonego sieci o opóźnieniu wolnochmiennym w określonych granicach można stosować metody analizy stabilności i metody syntezy regulatora z wykorzystaniem teorii układów odpornych [11] lub też wersję predyktora Smitha dla opóźnień niepewnych [18].

4. Weryfikacja metod i algorytmów sterowania rozproszonego

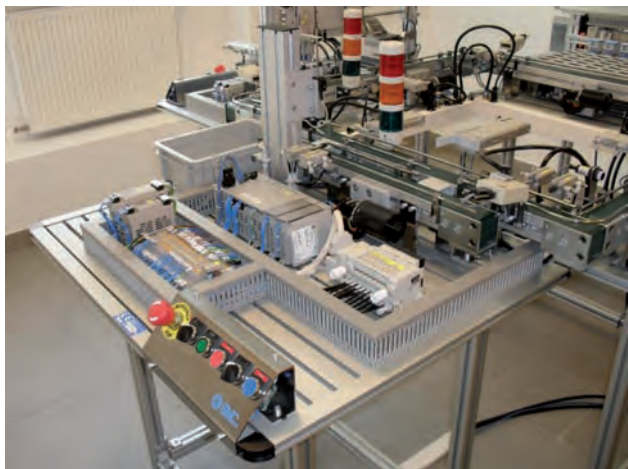
Z powyższych rozważań wynika, że rozproszone rozwiązania, zwłaszcza w układach sterowania o wymaganiach „twardego” czasu rzeczywistego, stawiają nowe zadania projektantom sprzętu, oprogramowania i algorytmów sterowania. W szczególności, obecność kanału transmisji danych w pętli sprzężenia zwrotnego może wносить do modelu dynamiki systemu sterowania komplikacje związane z opóźnieniami transmisji danych lub nawet z możliwością utraty danych. Jest to szczególnie istotne w systemach sterowania krytycznych ze względu na bezpieczeństwo procesu.

W systemach takich istotne jest symulacyjne i laboratoryjne testowanie wpływu efektów wnoszonych przez sieć na jakość sterowania, a w szczególności ograniczeń czasowych wnoszonych przez procesory i kanały transmisji danych, umieszczone w pętli sprzężenia zwrotnego.

Jeśli chodzi o metody symulacyjne, to standardowe przyborniki systemu MATLAB i środowisko Simulink nie dostarczają narzędzi umożliwiających symulację różnych protokołów transmisji danych ani innych efektów „sieciowych” wpływających na dynamikę układu sterowania (rys. 2), takich jak np. utrata danych w wyniku złych warunków propagacji sygnału w sieciach bezprzewodowych lub sposób synchronizacji pracy poszczególnych elementów składowych systemu rozproszonego. Takim rozszerzeniem środowiska symulacyjnego, odpowiednim do testowania układów sterowania rozproszonego jest przybornik *TrueTime* [26, 27]. Jest to narzędzie stworzone na bazie środowiska MATLAB/Simulink, służące do symulacji transmisji danych w sieciach przewodowych i bezprzewodowych, jak i modelowania zależności czasowych występujących w sterownikach umieszczonych w takiej konfiguracji.

W Laboratorium Sterowania Katedry Automatyki AGH zaprojektowano i uruchomiono szereg badawczych i dydaktycznych stanowisk laboratoryjnych i półprzemysłowych umożliwiających eksperymentalne testowanie metod i algorytmów sterowania rozproszonego. Większość z nich reprezentuje sprzęt, oprogramowanie i standardy transmisji danych stosowane w przemyśle. Wśród nich należy wymienić:

- Zestaw demonstracyjny umożliwiający zdalny dostęp ze stacji roboczych do systemu SCADA (iFIX) monitorującego pracę układu grzewczego AGH, w tym zdalne zbieranie danych.
- Układ umożliwiający zbieranie danych, monitorowanie i sterowanie nadrzędne pracy pieca na biomasę 100 kW wraz z akumulatorami energii (projekt aktualnie realizowany na wydziale Energetyki i Paliw AGH) – w technologii WAGO.
- Układ programowalnych sterowników logicznych PLC GE typu VersaMax, komunikujących się z wykorzystaniem sieci Ethernet i protokołu UDP/IP, sterujący kaskadowym układem zbiorników.
- Model linii technologicznej (rys. 6) złożony z komputera nadrzędnego (SCADA) i czterech stanowisk: produkcji, kontroli, zamykania pojemników i magazynowania. Pracą każdego stanowiska zarządza oddzielny programowalny sterownik logiczny PLC typu CompactLogix L32E firmy Allen Bradley. Magazyn wyposażony jest dodatkowo w panel dotykowy PanelView Plus 600. Wszystkie cztery sterowniki oraz panel połączone są przez koncentrator (hub) z siecią Ethernet. Za pośrednictwem odrębnego routera z wbudowanym przełącznikiem, do sieci dołączony jest także komputer klasy PC. Router z zaimplementowanym mechanizmem NAT pozwala odizolować sterowniki od sieci komputerowej ogólnouczelnianej, a jednocześnie umożliwia użytkownikom komputera korzystanie z zasobów Internetu (w tym serwera licencji programu MATLAB).
- Zestaw do eksperymentów w zakresie rozproszonego sterowania windą pneumatyczną, z wykorzystaniem



Rys. 6. Model linii produkcyjnej
Fig. 6. Model of the production line

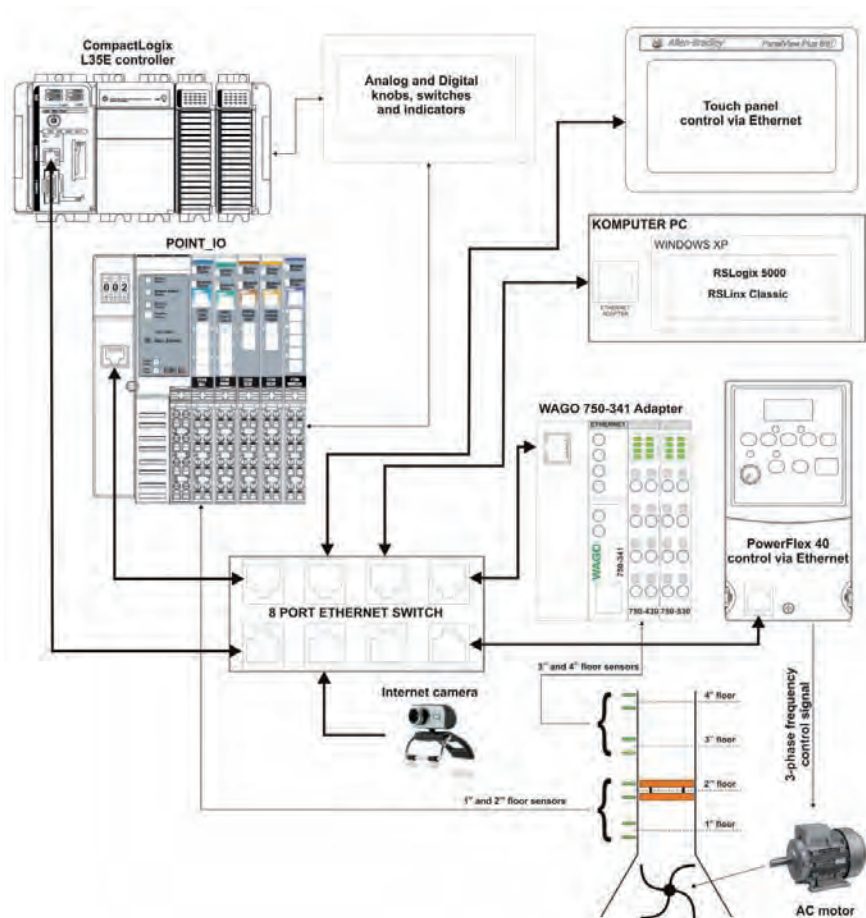
protokołu Ethernet IP (rys. 7). Węzły tego modelu to: sterownik logiczny Allen-Bradley typu Compact Logix, moduł wejść/wyjść cyfrowych, moduł szybkich liczników i wyjść analogowych, dotykowy panel operatorski Panel View Plus, falownik zasilany z jednofazowej sieci 230 V, sterujący silnikiem AC napędu windy, moduł wejść/wyjść analogowych WAGO.

- Stanowisko uruchomieniowe dla sieci LonWorks (automatyka budynków), które współpracujące z silnikiem prądu stałego małej mocy jako elementem wykonawczym nagrzewnic powietrza.
- Zestaw do eksperymentów i demonstracji zakresie sterowania rozproszonego napędem elektrycznym z protokołem EtherCAT (technologia Beckhoff).
- Zestawy do zdalnego monitorowania procesów z wykorzystaniem technologii rozproszonych układów pomiarowych Phoenix Contact.
- Implementacja standardu CAN: węzły sieci CAN zbudowane na bazie procesorów odpowiednio MPC i ColdFire.
- Zestaw do testowania systemów rozproszonych, zawierających implementacje protokołu IEC 61850 (automatyka stacji energetycznych) w wersji klient oraz serwer, wspierający protokół GOOSE (aktualnie rozwijany w ramach projektu badawczo-innowacyjnego *InnoEnergy* [28]).

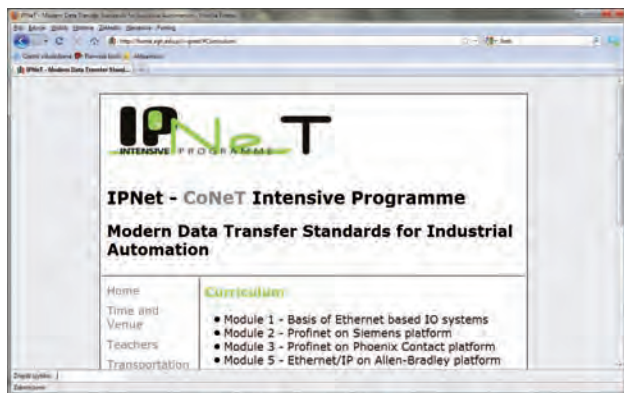
5. Kształcenie w zakresie sterowania rozproszonego

Wyniki badań naukowych i projektów badawczych realizowanych w Katedrze Automatyki AGH w zakresie sterowania rozproszonego, a także rozbudowywana baza laboratoryjna są z powodzeniem wykorzystywane w działalności dydaktycznej Katedry. W pierwszej kolejności na kierunku *Automatyka i Robotyka* (przedmioty *Integracja Systemów i Sterowanie Rozproszone*, *Zintegrowane Systemy Sterowania*, realizowany jest kurs w języku angielskim dla specjalności *Smart Grids* (dla kierunku *Elektrotechnika*) oraz kurs *Sterowanie Rozproszone* na studiach doktoranckich na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Elektroniki AGH. Prowadzone są kursy podyplomowe obejmujące tę tematykę, ale także międzynarodowe kursy związane z programami edukacyjnymi Unii Europejskiej. Katedra Automatyki AGH koordynuje trzy kolejne edycje kursu Intensive Programme (IP) Erasmus Mundus IPNet – *Modern Data Transfer Standards for Industrial Automation* [29] (rys. 8). Te innowacyjne osiągnięcia dydaktyczne były także przedmiotem publikacji [30, 31].

W ramach projektu edukacyjnego Unii Europejskiej CoNet [13], przy współpracy z europejskimi uniwersytetami technicznymi i partnerami przemysłowymi, budowane są unikalne stanowiska laboratoryjne wspierające kształcenie inżynierów w dziedzinie nowych technologii sterowania rozproszonego. Takie zapotrzebowanie potwierdziły m.in.



Rys. 7. Układ sterowania rozproszonego windą pneumatyczną [29]
Fig. 7. Distributed control system of the pneumatic lift [29]



Rys. 8. Strona internetowa kursu Modern Data Transfer Standards for Industrial Automation

Fig. 8. Website page of the Modern Data Transfer Standards for Industrial Automation course

ankiety przeprowadzone przez europejskie firmy zajmujące się integracją systemów automatyki [32].

6. Podsumowanie

Rozproszone systemy sterowania są rozwiązaniem powszechnie stosowanym we współczesnych układach automatyki przemysłowej oraz w coraz liczniejszych dziedzinach poza przemysłem, takich jak automatyka pojazdowa czy też domowa. Tendencja ta jest wynikiem coraz większej dostępności wydajnych węzłów pomiarowo-sterujących, zawierających, poza procesorem i układami peryferyjnymi, także interfejsy sieciowe. Liczne zalety takiego rozwiązania i coraz niższe koszty „inteligentnych węzłów” w układach automatyki spowodowały ewolucję systemów sterowania ze struktury multiplekserowej do sieciowej.

Od strony teoretycznej modele rozproszonych systemów automatyki mogą mieć bardziej złożoną dynamikę, co jest związane z opóźnieniami transmisji danych lub nawet możliwością ich utraty. Przykład, w jaki sposób można doskonaląc algorytmy sterowania aby te niekorzystne efekty wyeliminować i jakość sterowania przywrócić, był przedstawiony w części 3 tego artykułu. Jest to fragment wieloletnich badań naukowych i projektów realizowanych w Katedrze Automatyki AGH w Krakowie. Badania te były połączone z rozwojem dydaktyki na studiach magisterskich i doktoranckich i wsparte rozbudową zaplecza laboratoryjnego oraz licznymi (także przemysłowymi) aplikacjami, realizowanymi w ramach uczelnianych, krajowych i międzynarodowych projektów badawczych.

Bibliografia

- Zurawski R. (red.): *The Industrial Communication Systems Handbook*. CRC Press, 2005.
- Grega W.: *Problemy automatyki rozproszonej*. Automation 2007 – XI Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa, 2007, 1–13.
- Grega W.: *Współczesne metody automatyki w sterowaniu i monitorowaniu systemów energetycznych*. „Energetyka Ciepła i Zawodowa”, nr 1, 2002, 31–352.
- Leohold J.: *Communication Requirements for Automotive Systems – Keynote*. WFCSS 2004 [w:] 5th IEEE Workshop on Factory Communication Systems, Wien (2004), [www.ict.tuwien.ac.at/wfcs2004/].
- Grega W.: *Multilevel Control under Communication Constraint* [w:] Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, Yokohama, Japan, 2010, 1176–1181.
- Felsner M.: *Real-Time Ethernet – Industry Prospective*. Proceedings of the IEEE, nr 93, 2005, 1118–1129.
- Jansen D., Buttner H.: *Real-time Ethernet the EtherCAT Solution*. „Computing & Control Engineering Journal”, vol., 15, no. 1, 2006, 16–21.
- Grega W.: *Odporne układy automatyki rozproszonej*. „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 9, 2009, 115–122.
- Grega W.: *Sterowanie cyfrowe w systemach skupionych i rozproszonych*. Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, tom 7, 2004.
- Grega W.: *Stabilne układy sterowania rozproszonego*. Prace Międzywydziałowej Komisji Nauk Technicznych Polskiej Akademii Umiejętności, tom 1, 2005, 70–109.
- Grega W.: *Robust Networked Control*, [w:] Mueller A. (ed.): *Robust Control*, v.1, InTech, 2011.
- Projekt badawczy MNiSW NN514 298635 (2007–2008): *Odporne algorytmy sterowania rozproszonego*.
- [www.conet-eu.net] – *CoNeT/Co-operative Network Training*.
- Projekt badawczy Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, *Zintegrowany System Sterowania Produkcją* (INSTEPRO), Katedra Automatyki AGH, 2009–2012, [www.instepro.agh.edu.pl].
- Tutaj A.: *Odporne algorytmy sterowania rozproszonego*. Rozprawa Doktorska, AGH, Kraków, 2008.
- Grega W.: *Stability of Distributed Control Systems with Uncertain Delays* [w:] 8th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje 2002, 2001, 303–307.
- Grega W., Tutaj A.: *Network traffic reduction by sample grouping for distributed control systems* [w:] 3rd Proceedings International Workshop on: Networked Control Systems: Tolerant to Faults, June 20–21, Nancy, France, 2007, 2–8.
- Grega W.: *Sterowanie modelem nagrzewnicy powietrza przez sieć Ethernet* [w:] XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa, III, 2005, 193–198.
- Al-Hammouri A.T., Branicky M.S., Liberatore V., Phillips S.M.: *Decentralized and dynamic bandwidth allocation in networked control systems* [w:] 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 25–29 April 2006.
- Tutaj A.: *Packets buffering in network traffic in distributed control systems* [w:] Proceedings of 12th IEEE international conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 28–31 August 2006, Międzyzdroje, 2006, 27–28.
- Montestruque L.A., Antsaklis P.J.: *On the model-based control of networked systems*. „Automatica”, vol. 39, 2003, 1837–1843.

22. Gupta R.A., Chow M.-Y.: *Networked Control System: Overview and Research Trends*. „IEEE Transaction on Industrial Electronics”, vol. 57, no. 7, 2010, 2527–2535.
23. Vatanski N., Georges J.-P., Aubrun Ch., Rondeau E., Jämsä-Jounela S.-L.: *Networked Control with Delay Measurement and Estimation*. „Control Engineering Practice”, vol. 17, no. 2, 2009, 231–244.
24. Hassibi A., Boyd S.P., How J.P.: *Control of Asynchronous Dynamical Systems with Rate Constraints on Events* [w:] Proceedings of 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1999, 1345–1351.
25. Zhang W.: *Stability Analysis of Networked Control Systems*, PhD Thesis, Case Western Reserve University, 2001.
26. Grega W.: „Prawdziwy” czas w rozproszonych układach sterowania. „Pomiary Automatyka Robotyka” nr 12, 2009, 10–16.
27. Ohlin M., Henrikson D., Cervin A.: *TrueTime 1.5 – Reference Manual*, Department of Automatic Control. Lund University, 2007.
28. [www.kic-innoenergy.com/] – *KIC InnoEnergy*.
29. [http://home.agh.edu.pl/~ipnet] – *IPNeT – Modern Data Transfer Standards for Industrial Automation*.
30. Rosół M., Gorczyca P.: *Sterowanie rozproszone laboratoryjnym modelem helikoptera* [w:] XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa, tom III, 2005, 181–184.
31. Grega W., Papadourakis G.: *Mobile Laboratory for Training in Network Technologies*. „Electronics and Electrical Engineering”, no. 6(102), 2009, 139–142.
32. Grega W., Pilat A., Krol S., Daens D.: *Industry Feedback on Implementation of Network Technologies and Training Needs* [w:] Proceedings of the 22nd EAEEIE Annual Conference EAEEIE 2011, Maribor, Slovenia June 13–15, 2011, 77–80. ■

Distributed Automation

Abstract: Modern control systems are rarely found as autonomous control units. Usually they are connected by tele-transmission channels, exchanging data with other control units, and creating a distributed control systems (DCS). From theoretical point of view models of DCS may have more complex dynamics, which is associated with transmission delays or even the possibility of losing some data. DSC has been one of the main research focuses in academia as well as in industry for many years and has become a multidisciplinary area. The paper describes research and educational projects related to the DSC solutions, implemented at the Department of Automatics AGH in Kraków. The paper presents also an example of robust decentralized control algorithm that uses buffering method to compensate network delays. This example also shows how to model such a system and how to analyze its stability.

Keywords: distributed control, robust systems, stability, transmission protocols, real time

prof. dr hab. inż. Wojciech Grega

Profesor zwyczajny AGH w Krakowie. Autor ponad 150 prac naukowych, w tym 3 książek. Jego prace dotyczą sterowania komputerowego i optymalizacji, a w szczególności algorytmów sterowania cyfrowego, sterowania rozproszonego, modelowania i sterowania systemami wytwarzania i przesyłu energii. Opublikował także szereg prac z zakresu metodyki kształcenia w szkołach wyższych.

e-mail: wgr@ia.agh.edu.pl

