

# System SCADA we współpracy ze specjalnym algorytmem sterowania

Krzysztof Oprzędkiewicz

W pracy omówiono zasady realizacji systemu SCADA współpracującego ze specjalnymi algorytmami regulacji ciągłej realizowanymi na platformie sprzętowo-programowej PLC. Dodatkowym zadaniem wykonywanym przez aplikację jest dostrojenie regulatora do procesu na podstawie parametrów modelu obiektu oraz okresu próbkowania algorytmu. Jako przykład rozważono realizację systemu SCADA dla regulatora redukcyjnego zaimplementowanego na sterowniku SIMATIC S7-300 firmy Siemens. Badania testowe zbudowanej aplikacji wykazały pełną poprawność jej działania.

**F**unkcje systemów SCADA w układach automatyki są powszechnie znane. Pozwalają one na monitorowanie i nadzór sterowanego procesu, archiwizację danych procesowych, alarmowanie, realizację pracy ręcznej, tworzenie raportów itp. Jednocześnie, ze względu na możliwość stosowania skryptów realizujących złożone operacje obliczeniowe, jest także możliwe wykonywanie na poziomie systemu SCADA dodatkowych operacji obliczeniowych, np. związanych z dostrojeniem regulatora do procesu. Procedury autoadaptacji i samostrojzenia typowych algorytmów regulacyjnych (np. PID) są stosowane powszechnie przez wszystkich producentów sprzętu i oprogramowania sterującego.

Jednocześnie należy zauważyć, że w niektórych sytuacjach uzasadnione jest stosowanie specjalnych algorytmów regulacyjnych, które są budowane na bazie modelu obiektu regulacji. Dostrojenie lub autoadaptacja takiego algorytmu często wymagają wykonania złożonych operacji obliczeniowych, a jednocześnie wykonywane są stosunkowo rzadko podczas pracy systemu sterowania. Z tego względu jest uzasadniona implementacja procedur samostrojzenia na poziomie aplikacji SCADA, gdzie wyznaczone parametry regulatora są zapisywane do pamięci sterownika. Sterownik jest także wykorzystany do zbierania danych niezbędnych do wykonania procedury samostrojzenia regulatora.

W dalszej części pracy zostaną omówione ogólne zasady realizacji systemu SCADA przeznaczonego do współpracy ze specjalnym algorytmem sterowania, bazującym na znajomości modelu obiektu, przy czym algorytm sterowania jest zaimplementowany na platformie sprzętowo-programowej PLC. Jako przykład

zostanie zaprezentowana aplikacja SCADA dla regulatora redukcyjnego zaimplementowanego na sterowniku SIMATIC S7-300 firmy Siemens [12].

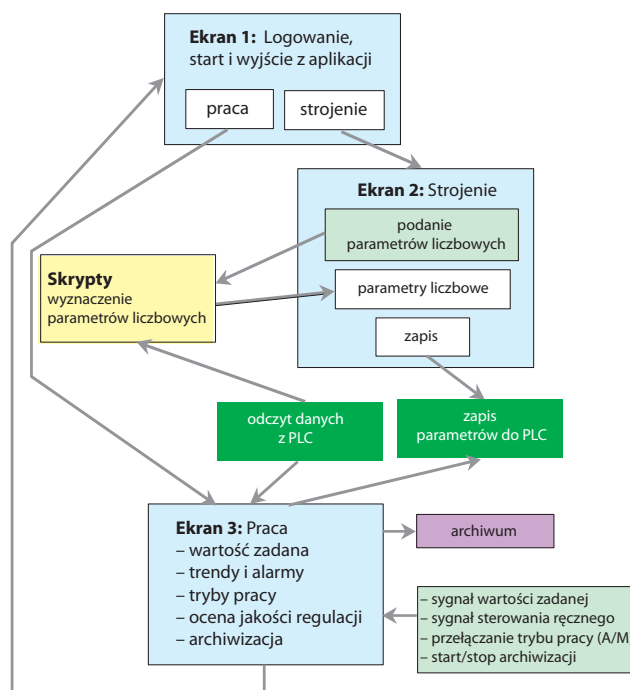
## Ogólne zasady konstrukcji aplikacji SCADA współpracującej z algorytmem specjalnym

Aplikacja SCADA współpracująca ze specjalnym algorytmem sterowania, bazującym na modelu obiektu, powinna zapewnić możliwość realizacji zarówno swoich podstawowych funkcji (monitorowanie i nadzór procesu, sterowanie przebiegiem pracy itp.), jak też dodatkowych funkcji, związanych z dostrojeniem algorytmu do sterowanego procesu.

W specjalnych algorytmach sterowania, bazujących na znajomości modelu obiektu, parametry algorytmu są zależne od parametrów modelu obiektu oraz od przyjętego okresu próbkowania. Każda sytuacja, stwarzająca potrzebę powtórnego dostrojenia regulatora (np. zmiana parametrów procesu powodująca pogorszenie jakości regulacji w układzie, zmiana okresu próbkowania), wiąże się z wykonaniem szeregu operacji obliczeniowych, często o dużej złożoności. Jednocześnie podczas typowej eksploatacji systemu sterowania, dostrajanie regulatora odbywa się stosunkowo rzadko, a nadzór nad jego przebiegiem powinien być zastrzeżony tylko dla określonej grupy użytkowników, węższej niż w przypadku typowej pracy systemu.

Na podstawie powyższych przesłanek wydaje się uzasadnione, żeby operacje obliczeniowe związane z dostrajaniem regulatora wykonywane były na poziomie aplikacji SCADA (rys. 1). Dane wejściowe niezbędne dla przeprowadzenia procedury są pobierane z procesu za pośrednictwem sterownika, gotowe wyznaczone parametry są również zapisywane do określonych obszarów pamięci sterownika z poziomu systemu SCADA.

dr inż. Krzysztof Oprzędkiewicz –  
Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza  
w Krakowie



Rys. 1. Ogólny schemat aplikacji SCADA współpracującej z algorytmem specjalnym

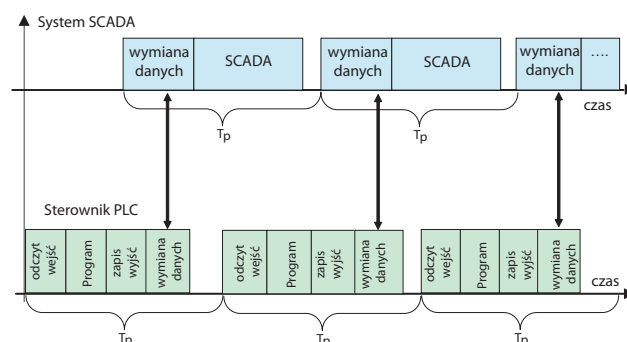
Aplikacja SCADA pokazana na rys. 1 zawiera 3 ekrany: ekran nr 1 jest ekranem startowym, służącym do logowania użytkownika i wyboru następnego ekranu, przy czym do wyboru są ekrany: nr 2 używany do dostrajania regulatora lub nr 3 używany podczas normalnej pracy aplikacji. Ekran dostrajania dostępny jest wyłącznie dla zastrzeżonej grupy użytkowników, ekran normalnej pracy dostępny jest dla każdego uprawnionego do zalogowania się w systemie. Podczas użytkowania aplikacji przełączanie ekranów odbywa się zgodnie ze stałą kolejnością: 1 → (2 lub 3) → 1.

Ekran nr 1 umożliwia zalogowanie się, a następnie przejście do ekranów nr 2 lub nr 3, zgodnie z posiadanymi uprawnieniami lub zakończenie pracy aplikacji. Możliwe jest zalogowanie się na 2 poziomach uprawnień: automatyk i technolog procesu, przy czym automatyk ma uprawnienia dostępu do obu ekranów, a technolog tylko do ekranu nr 3.

Ekran nr 2 jest używany do dostrajania algorytmu sterowania. Dostrojenie polega na wyznaczeniu liczbowych parametrów algorytmu zgodnie z określonymi wzorami, przy czym dane wejściowe do obliczeń mogą być częściowo wprowadzone przez operatora, a częściowo pobierane ze sterownika. W niektórych przypadkach dane mogą być wymieniane z inną aplikacją, pracującą w obrębie tej samej platformy, np. z systemem MATLAB/SIMULINK, służącym do wykonywania złożonych obliczeń. Z poziomu ekranu nr 2 są uruchamiane skrypty obliczające parametry, a te po akceptacji operatora są zapisywane do pamięci sterownika. W przypadku braku akceptacji, procedura wyznaczania nastaw może być powtórzona dla innego zestawu parametrów wejściowych pobranych z procesu lub wprowadzonych przez operatora.

Ekran nr 3 jest głównym ekranem używanym podczas normalnej pracy aplikacji i jego funkcje są typowe: umożliwia uruchamianie i zatrzymanie aplikacji, ustawianie poziomu wartości zadanej, przełączanie trybów pracy automatycznej i ręcznej, sterowanie ręczne, start i zatrzymanie archiwizacji zmiennych procesowych oraz ocenę jakości regulacji.

Wymiana danych pomiędzy aplikacją SCADA i sterownikiem PLC odbywa się pod koniec każdego cyklu programowego PLC (rys. 2). Wtedy następuje odczyt zmiennych procesowych ze sterownika do systemu SCADA (przy aktywnym ekranie 3) oraz zapis parametrów regulatora z aplikacji SCADA do pamięci sterownika po ich akceptacji przez operatora (przy aktywnym ekranie 2). Wymiana danych jest realizowana z częstością równą okresowi próbkowania  $T_p$  algorytmu, przy czym oba systemy pracują asynchronicznie. Wymiana danych odbywa się wg modelu „klient – serwer”, przy czym stroną inicjalizującą (klientem) jest system SCADA.

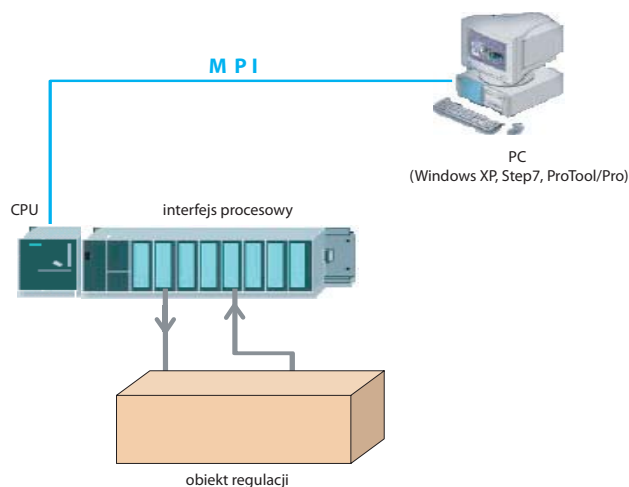


Rys. 2. Współpraca systemu SCADA ze sterownikiem PLC

## Doświadczalny układ regulacji cyfrowej

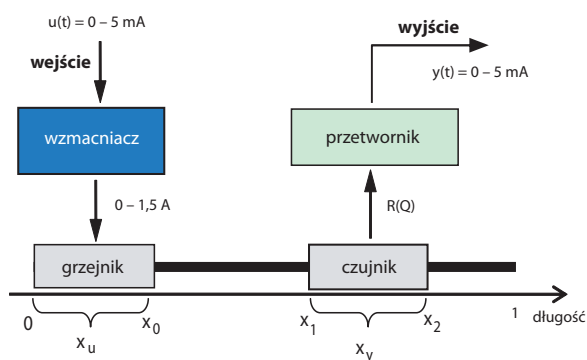
Aplikacja SCADA została zbudowana dla doświadczalnego układu regulacji cyfrowej (rys. 3). Jest to układ sterowania „hard PLC”. Sterownik PLC, SIMATIC S7-300 firmy Siemens, składa się z jednostki centralnej typu 315 oraz połączonego z CPU na wspólnej szynie interfejsu procesowego, zawierającego moduł wejść i wyjść dyskretnych, moduł wejść analogowych oraz moduł wyjść analogowych. Programator i stopień nadrzędny układu sterowania zrealizowane są na biurowym komputerze klasy PC. Komunikacja pomiędzy komputerem i PLC odbywa się z wykorzystaniem standardu MPI (karta komunikacyjna PROFIBUS/MPI w komputerze, port MPI w PLC). Komputer PC pełni rolę programatora oraz platformy sprzętowo-programowej do konfiguracji i uruchomienia aplikacji SCADA.

Obiektem regulacji w systemie sterowania (rys. 3) jest doświadczalny jednowymiarowy obiekt cieplny (rys. 4). Główną częścią obiektu jest pręt miedziany z zamocowanym na jednym z końców elementem grzejnym, sterowanym znormalizowanym sygnałem prądowym z zakresu 0 – 5 mA za pośrednictwem



Rys. 3. Konfiguracja sprzętowo-programowa systemu sterowania

wzmacniacza mocy. Temperatura pręta jest odczytywana za pomocą czujnika rezystancyjnego, zamocowanego w pewnej odległości od grzejnika. Sygnał z czujnika jest przetwarzany na znormalizowany sygnał prądowy z zakresu 0 – 5 mA.



Rys. 4. Uproszczony schemat obiektu regulacji

Zakresy 0 – 5 mA sygnałów: wejściowego i wyjściowego z obiektu regulacji odpowiadają wartościom całkowitoliczbowym: sygnału z wejścia analogowego sterownika oraz sygnału sterowania podawanego na wyjście analogowe sterownika z zakresu 0 – 6912. Przedział ten wynika z faktu, że sygnał z zakresu 0 – 5 mA jest odczytywany z użyciem wejścia prądowego o zakresie 0 – 20 mA współpracującego z 12-bitowym przetwornikiem A/C, w którym sygnał wejściowy 0 – 20 mA jest przetwarzany na wartość z przedziału 0 - 27648.

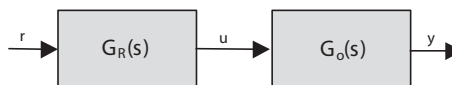
Rozpatrywany obiekt regulacji może być opisany zarówno za pomocą modelu dokładnego w postaci równania przewodnictwa cieplnego, jak i modelu przybliżonego w postaci transmitancji zastępczej. Modele matematyczne tego obiektu były dokładnie omówione w wielu wcześniejszych pracach autora ([8], [11]).

## Regulator redukcyjny

Dla celów syntezy regulatora redukcyjnego obiekt regulacji został opisany modelem zastępczym Strejca w postaci transmitancji  $n$ -tego rzędu bez opóźnienia:

$$G_o(s) = \frac{k}{(T_n s + 1)^n} \quad (1)$$

Zasadniczą ideą regulatora redukcyjnego (ang. *cancellation controller*) jest zbudowanie układu [8], którego dynamika pozwoliłaby na skompensowanie dynamiki obiektu regulacji. Konstrukcja regulatora redukcyjnego w wersji ciągłej była omawiana m.in. w pracy R. Góreckiego [3], a w wersji dyskretniej w pracy R. Isermanna [5]. Taki układ, w przypadku realizacji np. zadania nadążania zapewniłby natychmiastowe odtwarzanie zmian wejścia (w tym wypadku wartości zadanej) na wyjściu układu. Przy odpowiedniej konstrukcji układu możliwe byłoby też bardzo szybkie tłumienie zakłóceń. W przypadku idealnym, transmitancja wymuszeniowa całego układu regulacji powinna być równa 1. Dla przykładu, rozważmy najprostszy możliwy przypadek otwartego układu sterowania (rys. 5).



Rys. 5. Otwarty układ sterowania z regulatorem redukcyjnym

Jeżeli założymy, że transmitancja zastępcza całego układu z rys. 5 ma być równa 1, to natychmiast otrzymujemy wzór na transmitancję regulatora  $G_R(s)$  jako:

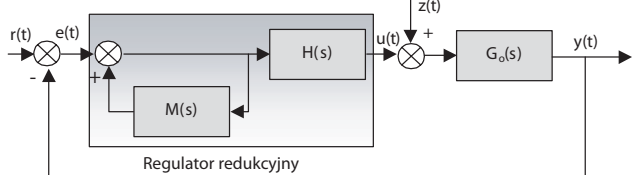
$$G_R(s) = \frac{1}{G_o(s)} \quad (2)$$

Można zauważyć, że podczas konstrukcji rzeczywistego regulatora redukcyjnego według (2) natrafiamy na dwie zasadnicze trudności:

- Pierwszym problemem jest realizowalność fizyczna układu, która wymaga spełnienia zasady przyczynowości. Oznacza to, że stopień licznika jakiegokolwiek transmitancji rzeczywistej nie może być wyższy niż stopień jej mianownika. Z tego względu rzeczywisty regulator redukcyjny, określony przez (2), może być zbudowany tylko dla pewnej wąskiej klasy rzeczywistych obiektów.
- Drugą trudnością, z jaką możemy się zetknąć podczas realizacji układu (2), jest niedokładność modelu matematycznego obiektu, opisanego transmitancją  $G_o(s)$ . Z tego względu w żadnym wypadku nie można przyjąć, że transmitancja zastępcza całego układu będzie równa 1.

Dlatego podczas syntezy układu rzeczywistego regulatora redukcyjnego postępuje się nieco inaczej, niż pokazano. Jedną z metod jest budowa regulatora w taki sposób (rys. 6), aby dynamika regulatora lub pewnej jego części mogła „zastąpić” dynamikę obiektu regulacji [3].

Założmy, że obiekt regulacji jest opisany modelem zastępczym Strejca bez opóźnienia (1), przy czym rząd



**Rys. 6.** Układ regulacji z regulatorem redukcyjnym.  
 $M(s)$  – transmitancja „zredukowanego” modelu obiektu  
 $H(s)$  – transmitancja korektora dynamicznego  
 $G_o(s)$  – transmitancja obiektu regulacji

transmitancji zastępczej  $n=3$ . Wtedy transmitancja obiektu przyjmie postać:

$$G_o(s) = \frac{k}{(T_n s + 1)^3} \quad (3)$$

Transmitancje  $M(s)$  oraz  $H(s)$  obu części regulatora przyjmą postać:

$$M(s) = \frac{1}{(\eta T_n s + 1)^3} \quad (4)$$

$$H(s) = \frac{1}{k} \cdot \left( \frac{T_n s + 1}{\eta T_n s + 1} \right)^3 \quad (5)$$

gdzie  $\eta$  – współczynnik redukcji dynamiki modelu.

Zdefiniujemy transmitancję zastępczą regulatora redukcyjnego:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (6)$$

Po uwzględnieniu (4) i (5) i przekształceniach, otrzymujemy:

$$G_R(s) = \frac{1}{k} \cdot \frac{(T_n s + 1)^3}{(\eta T_n s + 1)^3 - 1} \quad (7)$$

Zwróćmy uwagę, że transmitancja regulatora redukcyjnego (7), ma jeden biegun w zerze, co można interpretować jako obecność w regulatorze członu całkującego. Jest to korzystne ze względu na wprowadzenie astatyzmu do całego układu regulacji, analogicznie, jak w przypadku użycia regulatora PI. Transmitancja wymuszeniowa całego układu regulacji, po uwzględnieniu (7) i założeniu, że dynamika obiektu jest dokładnie opisana przez model, będzie mieć postać:

$$G_w(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{(\eta T_n s + 1)^3} \quad (8)$$

Na podstawie (8) można stwierdzić, że w przypadku znajomości dokładnego modelu obiektu (przypadek idealny), transmitancja całego układu regulacji „widziana” z wejścia będzie równa transmitancji modelu zredukowanego  $M(s)$ . Miarą dynamiki modelu zredukowanego, opisanego przez transmitancję  $M(s)$  jest wartość współczynnika  $\eta$ . Na podstawie (8) wi-

dzimy, że współczynnik ten opisuje, jak zmniejszy się zastępcza stała czasowa całego układu po zastosowaniu regulatora. Można zauważyć, że zakres wartości współczynnika  $\eta$ , sensowny z punktu widzenia zastosowań praktycznych rozważanego układu, zawiera się w przedziale (0; 1). Teoretycznie, zmniejszając ten współczynnik, można całkowicie „zredukować” dynamikę obiektu.

W przypadku rzeczywistym, gdy model opisuje dynamikę obiektu jedynie w sposób przybliżony, transmitancja wymuszeniowa całego układu nie będzie mieć tak prostej postaci jak (8), natomiast jakość regulacji z zastosowaniem regulatora redukcyjnego będzie nadal wysoka. Transmitancję (7) regulatora redukcyjnego można zapisać w równoważnej, wygodnej do realizacji praktycznej postaci:

$$G_R(s) = K_r \frac{T_n s + 1}{s} \cdot \frac{(T_n s + 1)^2}{(\eta T_n)^2 s^2 + 3(\eta T_n) s + 3} \quad (9)$$

Zauważmy, że pierwszy czynnik w transmitancji (9) jest transmitancją regulatora PI. Jeśli wprowadzimy oznaczenia:

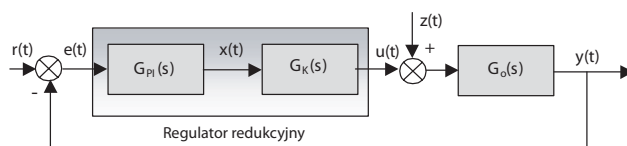
$$G_{PI}(s) = K_r \frac{T_n s + 1}{s} \quad (10)$$

$$G_K(s) = \frac{(T_n s + 1)^2}{(\eta T_n)^2 s^2 + 3(\eta T_n) s + 3}$$

to transmitancja regulatora redukcyjnego może być zapisana jako iloczyn transmitancji regulatora PI oraz korektora dynamicznego:

$$G_R(s) = G_{PI}(s) G_K(s) \quad (11)$$

Po uwzględnieniu (11), schemat blokowy układu regulacji z regulatorem redukcyjnym będzie jak na rys. 7.



**Rys. 7.** Układ regulacji z regulatorem redukcyjnym po przekształceniach

Dotychczasowe rozważania dotyczyły regulatora redukcyjnego w wersji ciągłej. Dla celów realizacji praktycznej tego układu na urządzeniu cyfrowym, należy przekształcić rozważany algorytm regulacyjny do postaci dyskretniej. W tym celu należy przejść z opisu algorytmu w dziedzinie zmiennej zespolonej „s” (7), (10) i (11), do opisu w dziedzinie czasu:

$$x(t) = K_r T_n e(t) + K_r \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \eta^2 T_n^2 \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + 3\eta T_n \frac{du(t)}{dt} + 3u(t) = \\ = T_n^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2T_n \frac{dx(t)}{dt} + x(t) \end{aligned} \quad (13)$$



Równania (12) i (13), ciągle w dziedzinie czasu, dyskretyzujemy, wprowadzając dyskretną skalę czasu i zastępując całą sumą oraz pochodne odpowiednimi ilorazami różnicowymi. Przy założeniu, że okres próbkowania jest równy  $T_p$  i znacznie mniejszy niż zastępcza stała czasowa  $T_n$  opisująca dynamikę obiektu ( $T_p \ll T_n$ ) oraz wprowadzając konwencję oznaczeń:  $u(nT_p) = u(n)$ ,  $e(nT_p) = e(n)$ ,  $x(nT_p) = x(n)$ , można równania (12) i (13) zapisać w postaci dyskretniej. Regulator PI opisuje zależność:

$$x(n) = Ke(n) + I \sum_{i=0}^n e(i) \quad (14)$$

Parametry regulatora PI:

$$K = \frac{1}{k\eta}, \quad I = \frac{kT_p}{T_n} \quad (15)$$

Korektor opisany jest równaniem rekurencyjnym:

$$\begin{aligned} a_n u(n) - a_{n-1} u(n-1) + a_{n-2} u(n-2) = \\ = b_n x(n) - b_{n-1} x(n-1) + b_{n-2} x(n-2) \end{aligned} \quad (16)$$

Współczynniki równania korektora są następujące:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{(\eta T_n)^2}{T_p^2} + \frac{3\eta T_n}{T_p} + 3 & b_n &= \frac{T_n^2}{T_p^2} + \frac{2T_n}{T_p} + 1 \\ a_{n-1} &= \frac{2(\eta T_n)^2}{T_p^2} + \frac{3\eta T_n}{T_p} & b_{n-1} &= \frac{2T_n^2}{T_p^2} + \frac{2T_n}{T_p} \\ a_{n-2} &= \frac{(\eta T_n)^2}{T_p^2} & b_{n-2} &= \frac{T_n^2}{T_p^2} \end{aligned} \quad (17)$$

Z równania korektora (16) wyznaczamy sterowanie  $u(n)$ , które ma być podawane na obiekt:

$$\begin{aligned} u(n) = \frac{a_{n-1}}{a_n} u(n-1) - \frac{a_{n-2}}{a_n} u(n-2) + \\ + \frac{b_n}{a_n} x(n) - \frac{b_{n-1}}{a_n} x(n-1) + \frac{b_{n-2}}{a_n} x(n-2) \end{aligned} \quad (18)$$

Dla uproszczenia zapisu (18) można wprowadzić oznaczenia:

$$\begin{aligned} w_1 = \frac{a_{n-1}}{a_n}, \quad w_2 = -\frac{a_{n-2}}{a_n}, \quad w_3 = \frac{b_n}{a_n} \\ w_4 = -\frac{b_{n-1}}{a_n}, \quad w_5 = \frac{b_{n-2}}{a_n} \end{aligned} \quad (19)$$

Teraz równanie korektora (18) przyjmie postać:

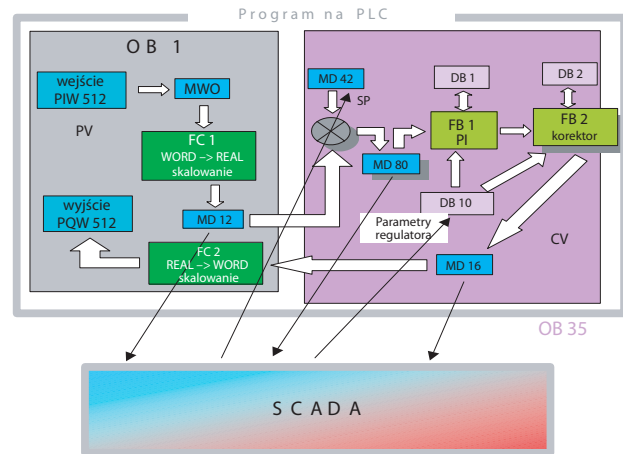
$$\begin{aligned} u(n) = w_1 u(n-1) + w_2 u(n-2) + \\ + w_3 x(n) + w_4 x(n-1) + w_5 x(n-2) \end{aligned} \quad (20)$$

Równania (12)–(20) stanowią pełny opis regulatora redukcyjnego w postaci dyskretniej. Mogą być bezpośrednio zrealizowane w blokach funkcyjnych podczas implementacji algorytmu. Współczynniki (15) oraz (19) są wyznaczane w skryptach aplikacji SCADA. W roz-

ważnym przypadku (dość proste współczynniki oraz jedna pętla regulacyjna) mogłyby być wyznaczane bezpośrednio w PLC, a nie na poziomie SCADA, lecz w przypadku ogólnym (na przykład: duża liczba złożonych obliczeniowo współczynników i konieczność ich optymalizacji, większa liczba pętli regulacyjnych itp.) wyznaczanie współczynników algorytmu na poziomie systemu SCADA dość znacznie „odciąża obliczeniowo” CPU sterownika.

## Implementacja algorytmu regulatora na platformie PLC firmy Siemens

Algorytm regulatora został zaimplementowany na platformie PLC firmy Siemens (rys. 8). W rozważanym przypadku dla aplikacji SCADA dostępne są zmienne bezpośrednio reprezentowane oraz blok danych DB10.



Rys. 8. Schemat realizacji algorytmu regulatora redukcyjnego na platformie PLC firmy Siemens

Algorytm sterowania opisany przez (14)–(20) jest realizowany pod nadzorem dwóch bloków organizacyjnych OB1 oraz OB35. Blok OB1 jest wykonywany w każdym cyklu programowym, a blok OB35 jest wykonywany ze stałą częstotliwością, definiowaną na etapie konfiguracji sprzętu. Ten okres aktywacji bloku OB35 jest okresem próbkowania algorytmu regulatora dyskretnego  $T_p$  i jest odczytywany przez aplikację SCADA podczas wyznaczania parametrów liczbowych algorytmu. Z poziomu SCADA jest on dostępny wyłącznie do odczytu.

W bloku OB1 realizowany jest odczyt sygnału wielkości regulowanej z wejścia analogowego i zapis sygnału sterującego na wyjście analogowe oraz konwersja i skalowanie wielkości regulowanej oraz sygnału sterującego. Pod nadzorem bloku OB35 wykonywane są instancje bloków funkcyjnych: FB1, realizującego algorytm regulatora PI (14) oraz bloku FB2 realizującego algorytm korektora dynamicznego (20).

Bloki danych DB1 oraz DB2 są blokami danych stowarzyszonymi z instancjami bloków funkcyjnych FB1 i FB2. Blok danych DB10 jest stosowany do przechowywania parametrów regulatora (15) oraz (19), wyznaczanych na poziomie aplikacji SCADA.

## Aplikacja SCADA współpracująca z regulatorem reducyjnym

Aplikacja SCADA zrealizowana zgodnie z opisanymi regułami została zbudowana z wykorzystaniem oprogramowania ProTool/Pro firmy Siemens [13]. Oprogramowanie to jest przyjazne dla użytkownika i bardzo dobrze przystosowane do współpracy z systemami PLC Siemens. Aplikacja SCADA jest budowana jako część projektu w STEP 7, zmienne systemu SCADA komunikujące się ze sterownikiem są skojarzone bezpośrednio ze zmiennymi bezpośrednio reprezentowanymi sterownika oraz blokiem danych DB10, zawierającym parametry regulatora; konfiguracja wymiany danych jest także prosta.

Zakres dopuszczalnych wartości współczynników  $\eta$ ,  $T_n$  oraz  $k$  jest uzasadniony fizyczną interpretacją parametrów zastępczego modelu obiektu oraz interpretacją współczynnika redukcji dynamiki modelu  $\eta$ . Wiadomo, że jego wartość powinna się zawierać w przedziale (0; 1). Na podstawie badań symulacyjnych [8, 10] stwierdzono, że najlepszą jakość regulacji dla rozważanego obiektu osiąga się dla współczynnika  $\eta = 0,38$ .

Działanie aplikacji jest zgodne ze schematem funkcjonalnym podanym na rys. 1. Po starcie jako pierwszy pojawia się ekran „logowanie”, który pozwala na realizację funkcji:

- przejście do ekranu nr 2 „strojenie”
- przejście do ekranu nr 3 „praca”
- zakończenie działania aplikacji.

Przejścia do ekranów 2 lub 3 mogą być zabezpieczone hasłami dostępu.

Ekran nr 2 „strojenie” umożliwia wyznaczenie parametrów algorytmu regulacji  $K, I$  zgodnie z (15) oraz  $w_1 - w_5$  zgodnie z (19). Do wyznaczenia tych parametrów wymagana jest znajomość parametrów transmitancji zastępczej obiektu, opisanej przez (1): zastępczej stałej czasowej  $T_n$  i wzmocnienia obiektu  $k$  oraz współczynnika  $\eta$ . Parametry te są wprowadzane przez operatora. Parametry modelu oraz współczynnik redukcji dynamiki  $\eta$  są zdefiniowane jako zmienne lokalne aplikacji, gdyż są używane wyłącznie do wyznaczenia parametrów regulatora. Podczas definiowania powyższych współczynników jest sprawdzana ich wartość. Przekroczenie dopuszczalnych zakresów współczynników jest sygnalizowane komunikatem i parametry regulatora nie są wyznaczane dopóty, dopóki nie podano poprawnych danych wejściowych.

Wartości parametrów regulatora są wyznaczane z wykorzystaniem skryptów, wykonanych po poprawnym wprowadzeniu parametrów modelu obiektu oraz naciśnięciu odpowiedniego przycisku znajdującego się na ekranie. Okres próbkowania  $T_p$ , niezbędny do ich wyznaczenia, jest odczytywany bezpośrednio ze sterownika. Jest to uzasadnione tym, iż w rozważanym wypadku jest on definiowany na poziomie konfiguracji sprzętu podczas budowy aplikacji sterującej (jest to okres uaktywniania bloku organizacyjnego OB35

przez przerwanie zegarowe). Wyznaczone wartości parametrów są wyświetlane, a po zaakceptowaniu przez operatora są zapisywane w bloku danych DB10 w pamięci sterownika.

W chwili startu aplikacji lub też jeżeli nie uruchomiono obliczenia nowych wartości, parametry regulatora są równe ich wartościom domyślnym, zapisanym w bloku danych DB10 dla okresu próbkowania równego 1 s oraz parametrów modelu obiektu podanych w tab. 1.

Tab. 1. Liczbowe wartości parametrów modelu transmitancyjnego (1)

Parametr	$k$	$T_n$ (s)	$n$
Wartość	1,18	22,03	3

Z ekranu nr 2 „strojenie” jest możliwe przejście tylko do ekranu nr 3 „praca”. Jest to ekran działający podczas normalnej pracy aplikacji. Z poziomu tego ekranu możliwa jest realizacja następujących funkcji systemu:

- przełączanie trybu pracy ręczny/automatyczny
- realizacja sterowania ręcznego za pomocą suwaka
- ustawianie wartości zadanej dla układu regulacji
- wyznaczanie trendów bieżących oraz archiwizacja wielkości regulowanej, wartości zadanej, uchybu regulacji i sygnału sterowania w układzie.

Wartość zadana oraz sygnał sterowania ręcznego są podawane z wykorzystaniem suwaków, przy czym zmienne skojarzone bezpośrednio z suwakami są typu całkowitego, z zakresu 0–6912. Jest to uzasadnione tym, że:

- z suwakiem może być skojarzona wyłącznie liczba typu całkowitego
- sygnał sterowania ręcznego może być podany bezpośrednio na wyjście analogowe, bez konieczności skalowania i konwersji typu.

Dla poprawy czytelności, wielkości sygnałów wartości zadanej oraz sygnału sterowania ręcznego są wyświetlane na ekranie w zapisie zmiennoprzecinkowym 0 – 5 mA.

Na ekranie nr 3 znajduje się także przełącznik obsługujący archiwizację zmiennych procesowych: wartości zadanej, wielkości regulowanej, sterowania, uchybu regulacji oraz trybu pracy (ręczny/automatyczny), które są zapisywane w formacie \*.csv. Z ekranu nr 3 „praca” można powrócić do ekranu nr 1 „logowanie”, który umożliwia przejście do trybu strojenia lub zakończenie pracy systemu.

## Przykładowy test działania systemu sterowania

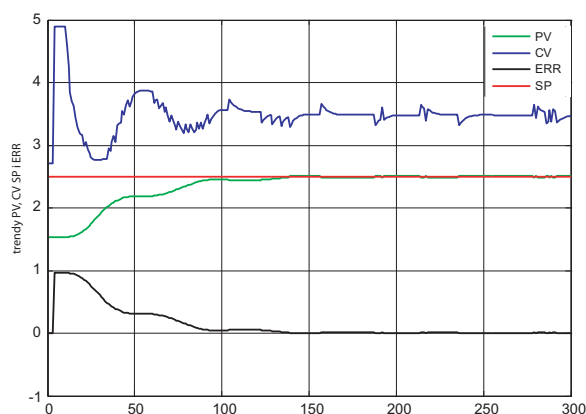
Działanie omówionego systemu sterowania wraz z aplikacją SCADA zostało sprawdzone dla parametrów modelu zastępczego obiektu (1) podanych w tab. 1, okresu próbkowania algorytmu  $T_p = 1$  s oraz współczynnika redukcji dynamiki  $\eta = 0,38$ . Parametry regulatora wyznaczone w systemie SCADA są poda-

ne w tab. 2. Metoda doboru współczynnika redukcji dynamiki  $\eta$  oraz przebiegi sygnałów w układzie z regulatorem redukcyjnym dla innych wartości  $\eta$  są podane w pracy [8].

**Tab. 2.** Liczbowe wartości parametrów równania (20) wyznaczone zgodnie z (15) i (19) dla obiektu o parametrach z tab. 1

Parametr	$K$	$I$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
Wartość	2,22	0,0534	1,6838	0,7142	5,4041	10,340	4,946

Przykładowe przebiegi trendów wartości zadanej, wielkości regulowanej, sterowania i uchybu regulacji w rozważanym układzie regulacji dla skokowej zmiany wartości zadanej z 1,5 mA na 2,5 mA oraz dla parametrów regulatora podanych w tab. 1 pokazane są na rys. 9.



**Rys. 9.** Przykładowe trendy wielkości regulowanej, uchybu regulacji oraz sygnału sterującego w układzie dla skokowej zmiany wartości zadanej z 1,5 mA na 2,5 mA. SP – wartość zadana, CV – wielkość regulowana, CV – sygnał sterowania, ERR – uchyb regulacji

Dla przebiegów z rys. 9 wartość czasu regulacji jest równa 71 s, a przebieg wielkości regulowanej nie wykazuje przeregulowań. Pozwala to na sformułowanie wniosku, że dla rozważanego obiektu regulacji oraz parametrów regulatora wyznaczonych w systemie SCADA działanie całego układu sterowania jest poprawne i w pełni zgodne z wcześniejszymi wynikami [8, 10].

## Uwagi końcowe

- Przedstawiony sposób realizacji aplikacji SCADA dla specjalnego algorytmu sterowania może być zadaptowany na innej platformie sprzętowo-programowej oraz stosowany dla innych algorytmów bazujących na znajomości modelu obiektu regulacji.
- W przypadku algorytmów specjalnych budowa aplikacji SCADA powinna być ściśle powiązana z budową aplikacji realizującej algorytm sterowania. Oprogramowanie sterujące należy budować z założeniem, że ma ono współpracować z systemem SCADA. Takie podejście znacznie ułatwia budowę systemu SCADA i jego integrację z resztą projektu.
- W ramach rozbudowy systemu planuje się dodanie modułu testowania jakości regulacji, zbudowanego na podstawie wyników omówionych w pracy [9], przy czym uruchomienie monitorowania jakości

powinno się odbywać automatycznie, po wystąpieniu jednego ze zdarzeń:

- zmiana wartości zadanej
- dostrojenie regulatora z nowymi parametrami
- przekroczenie określonej, progowej wartości przez uchyb regulacji podczas ustabilizowanej pracy systemu (po dostatecznie długim czasie od zmiany wartości zadanej lub zmiany nastaw).

W przypadku przekroczenia określonych, progowych wartości przez wskaźniki jakości należy powiadomić operatora, który może powtórnie uruchomić procedurę dostrajania regulatora.

- Inną planowaną rozbudową systemu SCADA jest dodanie układu sprawdzającego a priori (przed uruchomieniem sterowania) stabilność układu regulacji dla aktualnie wyliczanych parametrów regulatora przy założeniu, że stała czasowa  $T_n$  transmitancji zastępczej obiektu jest znana jedynie z pewnym przybliżeniem i opisana liczbą przedziałową. Układ testujący ma zapobiec definiowaniu takich parametrów regulatora, które przy założonej niepewności zastępczej stałej czasowej obiektu nie byłyby w stanie zapewnić poprawnej pracy układu sterowania.

## Bibliografia

1. Bailey D., Wright E.: *Practical SCADA for industry*, Elsevier 2003.
2. Berger H.: *Automating with STEP7 in STL and SCL*, MCD Corporate Publishing 2001.
3. Górecki R.: *Regulator redukcyjny*, Zeszyty Naukowe AGH Elektrotechnika, t. 15 (1996), z. 3, s. 267–279.
4. Grega W.: *Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych*, Wyd. AGH, 2004.
5. Isermann R.: *Digital Control Systems*, vol. 1 Springer, 1989.
6. Jakuszewski R.: *Programowanie systemów SCADA Proficy HMI/SCADA iFIX*, Wyd. Prac. Komp. J. Skalmierskiego, Gliwice 2006.
7. Kasprzyk J.: *Programowanie sterowników przemysłowych*, WNT Warszawa 2006.
8. Oprędkiewicz K.: *Dyskretny regulator redukcyjny i jego praktyczna implementacja*, Pomiary Automatyka Robotyka PAR 11/2001, s. 8–15.
9. Oprędkiewicz K.: *Monitorowanie jakości regulacji w cyfrowych układach sterowania*, Pomiary Automatyka Robotyka PAR 4/2002, s. 1–7.
10. Oprędkiewicz K.: *Symulacyjne dostrajanie specjalnych regulatorów cyfrowych*, Automatyka 2003, t. 7 z. 1–2, s. 205–220.
11. Oprędkiewicz K.: *Problemy implementacji specjalnych algorytmów regulacji ciągłej na platformach sprzętowo-programowych PLC*. Mat. XVI Krajowej Konferencji Automatyki, s. 622–632.
12. <http://www.automatyka.siemens.pl/solutionsand-products/2001.htm>
13. <http://www.automatyka.siemens.pl/solutionsand-products/3564.htm> ■