

Sterowanie tolerujące uszkodzenia (FTC) na bazie sterowników PLC

Piotr Wasiewicz

Instytut Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej

W artykule przedstawiono koncepcję projektowania układów automatyki, bazujących na sterownikach PLC, tolerujących uszkodzenia (FTC). Tolerowanie uszkodzeń osiągane jest dzięki stosowaniu sensorów wirtualnych oraz mechanizmów rekonfiguracji struktury programowej układu. Omówiono uniwersalny, programowy przełącznik rekonfiguracyjny, działający na zasadzie średniej ważonej, który przez odpowiedni dobór wag umożliwia realizację szeregu mechanizmów FTC. Sensory wirtualne projektowane są z użyciem opracowanego w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej programu MITforRD oraz programów konwertujących modele do postaci bloków funkcyjnych FB danego sterownika PLC.

Słowa kluczowe: sterowanie tolerujące uszkodzenia FTC, sterownik PLC, redundancja, rekonfiguracja, sensor wirtualny

Podwyższanie stopnia niezawodności urządzeń systemów automatyki (nie tylko sensorów, aktuatorów, sterowników, ale także komponentów instalacji technologicznych), nie gwarantuje poprawności przebiegu procesu. Bowiern oprócz uszkodzeń urządzeń, źródła nieprawidłowości mogą tkwić zarówno w samym procesie (zakłócenia w dostawie surowców i energii), jak też mogą wynikać z błędnej lub spóźnionej reakcji operatorów procesu. Dlatego konieczność stosowania i udoskonalania mechanizmów tolerowania uszkodzeń FTC (*Fault Tolerant Control*) w układach automatyki jest bezdyskusyjna.

Problematyka FTC w układach automatyki jest już od dawna tematem publikacji [1, 2]. Koncepcję struktury funkcjonalnej regulatora mikroprocesorowego, tolerującego uszkodzenia torów pomiarowych zmiennych procesowych przedstawiono w [1]. W ostatnich latach obserwuje się intensyfikację badań naukowych w tym obszarze wiedzy. Dostępne są również podręczniki z tego zakresu [3, 4].

Na potrzeby realizacji koncepcji FTC niezbędne jest dysponowanie odpowiednim systemem diagnostycznym, z reguły wymagającym dużej mocy obliczeniowej, dlatego przewidziane zlokalizowanym w odrębnej stacji diagnostycznej lub procesowej systemu automatyki. Natomiast współcześnie procesy przemysłowe automatyzowane są głównie z użyciem sterowników PLC (*Programmable Logic Controller*) [10]. W najprostszej i najtańszej wersji systemów automatyki współpracują one z systemami sterowania i monitorowania SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Stanowią również podstawowe elementy komputerów przemysłowych IPC (*Industrial Personal Computer*), pozostając w integracji z PC oraz interfejsem operatorskim i sieciowym. Wchodzą w skład systemów sterowania DCS (*Distributed Control System*). Występują też w postaci wirtualnej (*SoftControl, SoftLogic, SoftPLC*).

Dlatego też uzasadnione są działania zmierzające do przeniesienia zadań diagnostyczno-zabezpieczających do sterowników PLC [1, 2, 5, 6, 7, 9]. Dodatkowo przemawia za tym fakt, że w bardziej zaawansowanych sterownikach PLC dostępne są bloki funkcyjne FB (języka FBD) ułatwiające rekonfigurację struktury programowej układów regulacji i sterowania. Są to różnego rodzaju programowe przełączniki sygnałów (*switch*), wybieraki sygnałów typu min/max (*selector*), multipleksery, demultipleksery. Dostępne są również adaptacyjne algorytmy regulacji PID (np. wyłączanie akcji I lub D w funkcji wartości odchył-

ki regulacji lub za pomocą zewnętrznego sygnału dyskretnego, czy też zmiana wartości nastaw poszczególnych akcji PID wraz ze zmianą punktu pracy). Umożliwiają one również wyprowadzenie na wyjście regulatora zadeklarowanej *wartości bezpiecznej* (np. sygnału z redundancyjnego algorytmu PID, cząstkowego modelu procesu, zaprogramowanego trendu itp.).

Wszystkie te mechanizmy programowe wymagają dysponowania alternatywną informacją o procesie, której jedną z bardziej skutecznych form stanowią sensory wirtualne. Należy podkreślić brak narzędzi wspomagających w tym zakresie programowanie sterowników PLC.

Realizacja koncepcji FTC w sterownikach PLC

Oprogramowanie diagnostyczne MITforRD

W Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej został opracowany (i nadal jest rozwijany) system monitorowania i diagnostyki on-line AMandD (*Advanced Monitoring and Diagnostic*). Opis możliwości funkcjonalnych systemu AMandD podano w [3, 6, 7].

Przy realizacji koncepcji FTC dla sterowników PLC system AMandD może być wykorzystany jako zadanie wykonywane w niezależnej stacji diagnostycznej (posiadającej większą moc obliczeniową aniżeli sterownik PLC). Wyznaczone, na podstawie danych uzyskanych ze sterownika PLC, wartości wirtualnych zmiennych procesowych oraz odpowiednie decyzje rekonfiguracyjne mogą być następnie przesłane do sterownika PLC (rys. 1). Jednakże koncepcja ta może powodować opóźnienia w wykonaniu akcji zabezpieczających.

Inne rozwiązanie może znacząco przyspieszyć reakcję na wystąpienie nieprawidłowości (rys. 2). Polega ono na zaimplementowaniu w sterowniku PLC odpowiednich procedur diagnostyczno-zabezpieczających (przygotowanych uprzednio w trybie off-line w systemie AMandD). Należy się jednak liczyć z możliwością pewnych ograniczeń sprzętowych i programowych, przynajmniej w przypadku niektórych sterowników PLC.

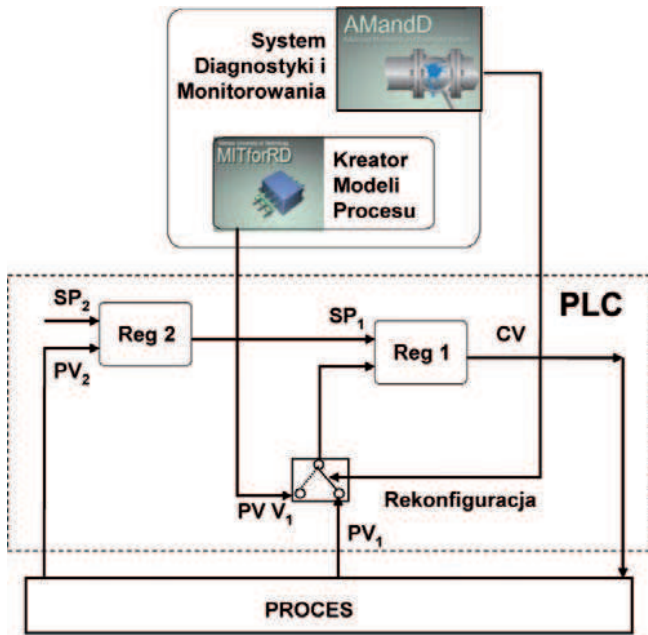
W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania w sterownikach PLC niektórych narzędzi programowych systemu AMandD, zwłaszcza tych do kreowania sensorów wirtualnych.

Uniwersalny mechanizm rekonfiguracji dla sterowników PLC

Rekonfiguracji algorytmów regulacji w sterowniku PLC, można dokonać z użyciem uniwersalnego przełącznika sygnałów, działającego na zasadzie średniej ważonej (rys. 3).

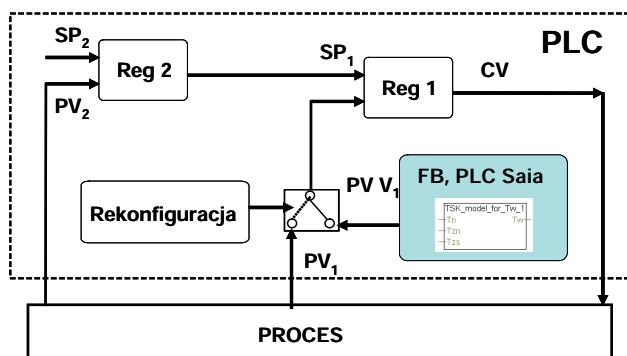
Procedura modyfikacji wag, polegająca na odpowiednim doborze ich wartości (w zakresie $w_i \in [0, 1]$, tak aby ich suma była równa 1), umożliwia realizację następujących mechanizmów FTC:

- Przełączanie sygnałów (*switch, selector*), gdy waga $w_i=1$ występuje tylko dla jednego z wejść sumatora, a wagi pozostałych wejść są równe 0.
- Redundancja statyczna typu „k z n” (*„k oo n”*), polegająca na głosowaniu przy wyborze źródła wielkości mierzonej. Redundancja sprzętowa jest najprostszym (niestety i najdroższym) sposobem tolerowania uszkodzeń układów automatyki. Uwzględnia ona stosowanie nadmiarowości sprzętowej (*hardware redundancy*) w zakresie sensorów, jednostek CPU sterowników PLC, modułów we/wy procesowych, a nawet całych stacji procesowych i operatorskich. Redundowane mogą być również aktuatory i komponenty instalacji technologicznych [8]. Redundancja sprzętowa wymaga obsługi programowej, niedostępnej w sterownikach PLC. Na rys. 4 przedstawiono specjalnie opracowaną dla sterowników PLC Saia bibliotekę bloków funkcyjnych, zawierającą m.in. redundancję „1 oo 2” (realizacja blokad) oraz „2 oo 3” (wyeliminowanie uszkodzonego sensora ze zbioru trzech sensorów redundancyjnych).
- Redundancja funkcjonalna, analityczna (*software redundancy*), dotycząca nadmiarowości w zakresie struktury programowej oraz zbioru algorytmów regulacji przygotowanych dla różnych punktów pracy procesu lub dla możliwych do wystąpienia uszkodzeń. Umożliwia ona rekonfigurację struktury programowej złożonych układów regulacji, polegającą na zmianie algorytmu regulacji, np. z kaskadowej stosunku na kaskadową lub stałowartościową. Przykładowo,



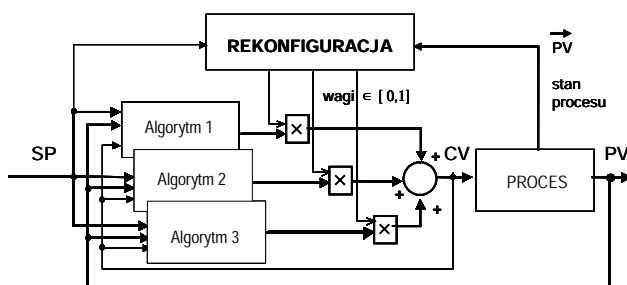
Rys. 1. Schemat systemu tolerującego uszkodzenie sensora PV_1 z użyciem redundancji funkcjonalnej PVV_1 wyznaczanej przez system AMandD, poza sterownikiem PLC

Fig. 1. Diagram of FTC system tolerating fault of PV_1 sensor with use of PVV_1 functional redundancy, calculated outside PLC controller by AMandD system



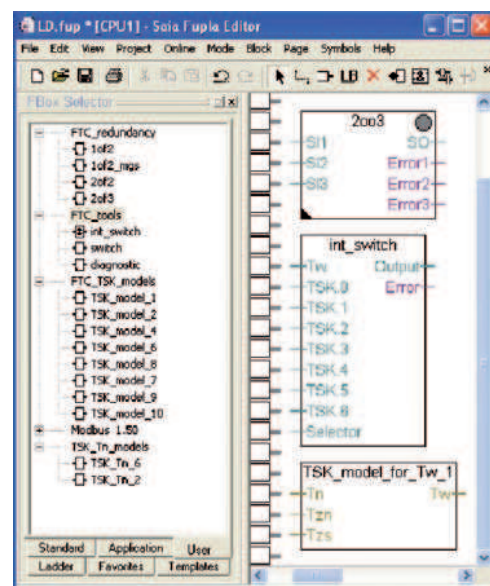
Rys. 2. Schemat systemu tolerującego uszkodzenie sensora PV_1 z użyciem mechanizmów FTC zaimplementowanych w sterowniku PLC

Fig. 2. Diagram of FTC system tolerating fault of PV_1 sensor with use of FTC mechanisms implemented inside PLC controller



Rys. 3. Schemat układu regulacji o strukturze rekonfigurowanej za pomocą uniwersalnego przełącznika sygnałów (zasada średniej ważonej)

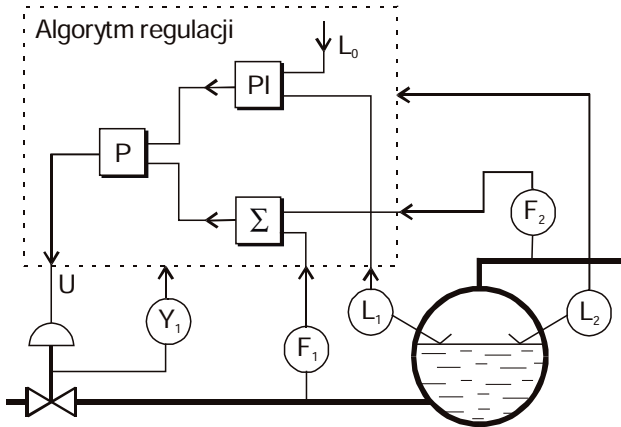
Fig. 3. Diagram of automatic control system structure reconfigurable by use of a universal signal switch (weighted average principle)



Rys. 4. Biblioteki użytkowe FTC opracowane dla sterowników PLC Saia, zlokalizowane w zakładce *User* edytora języka FBD

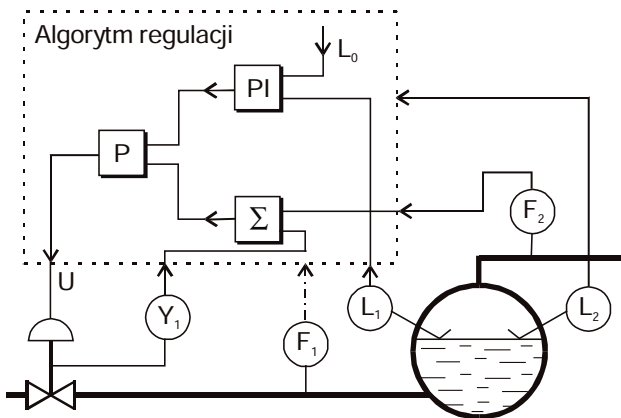
Fig. 4. FTC software libraries prepared for Saia PLC controllers, localized in *User* toolbox of FBD editor

na rys. 5 przedstawiono schemat funkcjonalny układu regulacji poziomu wody w stanie pełnej sprawności, natomiast na rys. 6 – w przypadku uszkodzenia sensora przepływu F_1 , dla którego przewidziano redundancję analityczną w postaci: $F_{1R}=f(L_1, Y_1)$. Oczywiście, w układzie tym można w każdej chwili dokonać wyboru zmiennej L_2 zamiast L_1 lub wykorzystywać np. wartość średnią obu tych wielkości.



Rys. 5. Schemat funkcjonalny przykładowego układu kaskadowej regulacji poziomu wody w stanie pełnej sprawności urządzeń

Fig. 5. Functional diagram of a water level cascade control system in the case of full efficiency of all devices



Rys. 6. Schemat funkcjonalny układu regulacji poziomu wody z rys. 5, w stanie z uszkodzonym torem pomiarowym F_1

Fig. 6. Functional diagram of the control system shown in fig. 5 in the case, when the fault of F_1 measuring circuit occurred

d) Ciągła zmiana wartości nastaw algorytmu PID wraz ze zmianą punktu pracy nieliniowego procesu. W tym przypadku dla wszystkich wejść przełącznika przygotowane są algorytmy PID z nastawami odpowiadającymi wyróżnionym punktom pracy, natomiast wartości wag zmieniają się rosnąco w kierunku zmiany położenia punktu pracy (tak aby suma wag była zawsze równa 1).

Generatory sensorów wirtualnych dla sterowników PLC

Koncepcję generowania sensorów wirtualnych dla sterowników PLC przedstawiono na rys. 7. Modele cząstkowe procesu (lub algorytmów sterowania) generowane są w trybie of-

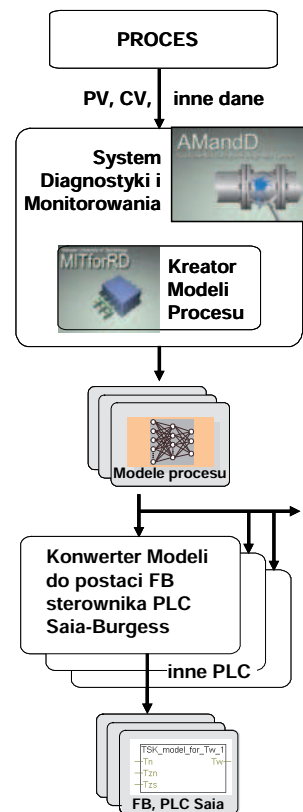
f-line na podstawie rzeczywistych lub archiwalnych wartości zmiennych procesowych przez moduł programowy MITforRD (*Model Identification Tool for Reconstruction and Diagnosis*) systemu AMandD.

Modele procesu, w postaci plików tekstowych XML, są przetwarzane do postaci bloków funkcyjnych FB, zgodnie ze standardem danego sterownika PLC, za pomocą odpowiednich konwerterów (opracowanych indywidualnie dla każdego typu PLC). Tak wygenerowane bloki FB, umieszczone w bibliotekach systemowych edytorów języka FBD sterowników PLC, pozostają do dyspozycji użytkowników podczas tworzenia nowych programów sterujących.

Program MITforRD umożliwia kreowanie różnych modeli matematycznych, m.in.: klasycznych modeli liniowych definiowanych w postaci dyskretnych transmitancji, sztucznych sieci neuronowych, rozmytych modeli neuronowych TSK-FNN (*Takagi-Sugeno-Kanga-Fuzzy Neural Network*), modeli wielomianowych. Lista ta nie wyczerpuje wszystkich możliwych rodzajów modeli, a otwarta architektura systemu (zastosowane techniki plug-in) umożliwia swobodne jej rozszerzenie.

Szczególne znaczenie praktyczne mają modele TSK-FNN, charakteryzujące się swobodą w doborze struktury, parametrów i współczynników opisujących właściwości systemu w poszczególnych punktach pracy. Część wnioskująca reguł rozmytych ma postać wielomianu. Identyfikacja tych modeli jest dokonywana za pomocą specjalizowanego algorytmu ewolucyjnego. Są one wygodne w użyciu i zapewniają dużą dokładność odwzorowywania rzeczywistości.

Metodyka projektowania sensorów wirtualnych z wykorzystaniem programu MITforRD została zastosowana do wygenerowania sensorów wirtualnych temperatury dla stacji klimatyzacji magazynu leków. Motywację podjętych badań stanowiła konieczność dokonywania okresowego demontażu czujników pomiarowych w celu walidacji. Aplikacja została wykonana z wykorzystaniem sterownika PLC Saia-Burgess. Konwerter przetwarzający modele TSK-FNN do postaci bloków funkcyjnych FB tego sterownika opracowano w środowisku programowym MATLAB Simulink. Bloki FB generowane są w języku tekstowym IL (*Instruction List*) sterowników PLC.



Rys. 7. Metodyka projektowania sensorów wirtualnych z wykorzystaniem programu MITforRD i specjalizowanych programów konwertujących modele do postaci bloków funkcyjnych sterowników PLC

Fig. 7. Development methodology of virtual sensors with use of MITforRD software and specialized programs converting models into the shape of PLC FBs

Metodyka projektowania sensorów wirtualnych z wykorzystaniem programów AMandD i MITforRD została również zweryfikowana w układach automatycznej regulacji zaimplementowanych w zdecentralizowanym systemie sterowania DeltaV. W [5, 7] przedstawiono wyniki badań aplikacji różnych rodzajów modeli procesu w układzie kaskadowej regulacji poziomu wody w stanowisku badawczym IAIr PW. Natomiast, w [9] omówiono efekty wykorzystania modeli TSK-FNN dla celów tolerowania uszkodzeń torów pomiarowych w instalacji przygotowania i oczyszczania celulozy. Dla potrzeb środowiska programowego systemu DCS: DeltaV przygotowano (w języku C++) program konwertujący modele procesu do postaci bloków funkcyjnych FB sterowników PLC systemu DCS: DeltaV. Bloki FB generowane są w języku tekstowym ST (*Structured Text*).

Prowadzone są badania nad projektem wirtualnego sensora szacującego liczbę osób przebywających w pasażu galerii handlowej na podstawie pomiaru zawartości CO₂ w powietrzu. Implementacja dokonywana jest w instalacji klimatyzacyjnej sterowanej systemem EBI (Honeywell *Enterprise Building Integrator*).

Podsumowanie

Zastosowanie sensorów wirtualnych w sterownikach PLC podwyższa niezawodność układów automatyki dzięki zapewnieniu szybkiej reakcji na uszkodzenia. Sensory wirtualne są szczególnie przydatne w sytuacjach, gdy pomiar wartości zmiennych procesowych nie jest możliwy (realizacja pomiaru jest zbyt kosztowna, brak możliwości zamontowania sensora w instalacji technologicznej lub brak odpowiedniej metody pomiaru). Są one również przydatne w przypadku konieczności okresowego przeprowadzania procedur certyfikacji sprzętu pomiarowego.

Bibliografia

1. Wasiewicz P.: *Functional structure of a microprocessor based controller tolerating failures in measuring circuits*. IFAC Workshop on Instrumentation Systems for Safeguarding and Control, The Hague, Netherlands 1986, p. 67–72.
2. Kościelny J.M., Wasiewicz P.: *The Sensitivity of Diagnostic Systems to the set of Measuring Signals*. The 3rd IEEE Conference on Control Application. Glasgow 1994, p. 1145–1150.
3. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: *Fault Diagnosis*. Springer-Verlag 2004.
4. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M.: *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer-Verlag 2004.
5. Wasiewicz P., Leszczyński M.: *Design station for fault tolerant control systems*. Instytut Technologii Eksploatacji PIB, Problemy Eksploatacji, 2/2006 (61), s. 99–111.
6. Wasiewicz P.: *Development platform for fault tolerant control systems*. International Conference on Electrical and Control Technologies ECT'06. Kaunas, Lithuania, May 4–5, 2006.
7. Wasiewicz P., Leszczyński M.: *Design station for fault tolerant control systems*. 6th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes SAFE PROCESS'06, Beijing, P.R. China, August 29 – September 1, 2006.
8. Wasiewicz P., Pawlak M.: *Development of fault tolerant control system for condensation power turbine*. 6th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes SAFEPROCESS'06, Beijing, P.R. China, August 29 – September 1, 2006.
9. Leszczyński M., Wasiewicz P.: *System sterowania tolerujący uszkodzenia dla instalacji przygotowania celulozy*. VIII KK – DPS'07, Słubice, wrzesień 2007.
10. Wasiewicz P.: *Regulatory przemysłowe*. Preskrypt PW, 2010. ■

Fault Tolerant Control (FTC) based on PLC controllers

Development concept of FTC (fault tolerant control) systems based on PLC controllers has been presented in the paper. Fault toleration is achieved thanks to application of virtual sensors and system software structure reconfiguration mechanisms. The universal software switch acting on the weight average principle, has been presented. It enables creation of different FTC mechanisms by means of adjusting of appropriate weight values. Virtual sensors are created with use of MITforRD program developed in IAIr PW. They are next converted by specialised programs into the shape individual for each PLC controller.

Keywords: Fault Tolerant Control (FTC), PLC controller, redundancy, reconfiguration, virtual sensor

dr inż. Piotr Wasiewicz

Działalność naukowa w zakresie projektowania układów automatyki tolerujących uszkodzenia (FTC) oraz systemów nadzorowania i monitorowania procesów. Autor 4 podręczników, 48 publikacji i 11 projektów badawczych (w tym 3 sponsorowanych przez EU). Obszary badań aplikacyjnych: system nadzorowania i monitorowania procesów w cukrowni Lublin, generatory modeli TSK procesu dla sterowników PLC (m.in. Saia-Burgess, systemu DCS DeltaV).



e-mail: p.wasiewicz@mchtr.pw.edu.pl