

INSTEPRO: Zintegrowany System Sterowania Produkcją¹, cz. 2

Maciej Klemiato, Jacek Augustyn, Jan T. Duda

Abstrakt. Artykuł przedstawia koncepcję Zintegrowanego Systemu Sterowania Produkcją, będącego częścią informatycznej infrastruktury przedsiębiorstwa, przetwarzającego dane z produkcji i wspierającego zarządzanie zarówno na poziomie przedsiębiorstwa, jak i procesu produkcyjnego. System taki służyłby do monitorowania, kontroli, nadzoru i sterowania procesami wytwórczymi w środowiskach produkcyjnych przedsiębiorstw posiadających zarówno Systemy Planowania Zasobów (ERP) jak i Systemy Akwizycji Danych (SCADA). W artykule zaproponowana została architektura takiego systemu z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi oferowanych obecnie przez teorię sterowania i informatykę.

1 Wstęp

Niniejszy artykuł jest drugą częścią opracowania dotyczącego projektu „Zintegrowany System Sterowania Produkcją” (INSTEPRO). Jak już wspomniano w części pierwszej artykułu, idea systemu powstała i jest realizowana w Katedrze Automatyki AGH w odpowiedzi na zapotrzebowanie sygnalizowane z gospodarki, wynikające z luki informatycznej pomiędzy systemami zarządzania firmą, a rzeczywistą sytuacją w środowisku produkcyjnym przedsiębiorstw. Celem tego projektu jest stworzenie narzędzia informatycznego do monitorowania, kontroli, nadzoru i sterowania procesami wytwórczymi w środowiskach produkcyjnych przedsiębiorstw wykorzystujących Systemy Planowania Zasobów ERP (ang. *Enterprise Resource Planning*) jak i Systemy Akwizycji Danych SCADA (ang. *Supervisory Control and Data Acquisition*) w procesie produkcyjnym.

W pierwszej części artykułu pokazano obecne trendy w hierarchicznym strukturyzowaniu systemów sterowania i opisano poszczególne warstwy tej struktury. Omówiono obecne na rynku rozwiązania software’owe oraz standardy, wspomagające zarządzanie i sterowanie produkcją. Ponad to, opisano architekturę systemu INSTEPRO, bazującą na niezależnych, komunikujących się ze sobą modułach, realizujących określone zadania.

Niniejsza, druga część artykułu szerzej prezentuje modułową architekturę systemu. W kolejnych rozdziałach zostaną opisane najważniejsze moduły, z których składa się system oraz zadania merytoryczne przez nie realizowane.

2 Modułowa budowa systemu

System INSTEPRO ma budowę modułową, każdy z modułów jest niezależnym procesem systemu operacyjnego wykonującym się we własnym, chronionym obszarze pamięci. Moduły

¹ Artykuł został napisany w ramach grantu finansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (w ramach Priorytetu 1, Działanie 1.3. PO IG, Poddziałanie 1.3.1). Nr grantu: UDA-POIG.01.03.01-12-171/08/00

zawierają dedykowane algorytmy odpowiedzialne za poszczególne zadania, dopasowane do rozmaitych typów produkcji. Do zbioru niezbędnych modułów, zapewniających wymaganą użyteczność całego systemu jako narzędzia informatycznego wspomagającego sterowanie i optymalizację procesu produkcyjnego, można zaliczyć następujące elementy:

- Platformę interfejsów, transmisji danych, koordynacji i nadzoru modułów
- Moduł eksploracji danych procesowych
- Moduł identyfikacji modeli statycznych
- Moduł identyfikacji modeli dynamicznych
- Moduł analizy zdarzeń w szeregach zmiennych procesowych
- Podsystem zaawansowanej analizy diagnostycznej
- Moduł symulatora
- Moduł niestandardowych algorytmów regulacyjnych
- Moduł optymalizacyjny procesów

Wymienione powyżej moduły zostaną dokładniej opisane w kolejnych podrozdziałach.

2.1 Platforma interfejsów, transmisji danych, koordynacji i nadzoru modułów

Moduł ten stanowi warstwę pośredniczącą pomiędzy warstwą sterowania bezpośredniego (cyfrowego) a całym systemem, realizującą podstawowe usługi, takie jak:

- integracja z automatyką procesową
- integracja z systemami SCADA
- integracja z modułami produkcyjnymi ERP
- koordynacja, nadzór i komunikacji pozostałych modułów w ramach systemu

W szczególności, moduł ten realizuje zadania, takie jak:

- czuwa nad całością procesu komunikacji i wymiany danych pomiędzy platformą danych, a warstwą ERP
- reaguje na zdarzenia zachodzące w procesie produkcyjnym (procesowej bazie danych systemu SCADA) i na ich podstawie inicjuje przesłanie odpowiednich danych między integrowanymi systemami
- nadzoruje proces komunikacji oraz sprawdza zgodność i poprawność przesłania każdej partii danych
- kontroluje stan połączenia z integrowanymi systemami
- zapisuje historię procesu komunikacji
- uruchamia dodatkowe moduły, w tym zaawansowane usługi sterowania i monitoruje ich realizację

Podstawowym założeniem, realizowanym i nadzorowanym przez moduł platformy interfejsów jest warunek, aby działanie systemu nie wpływało w żaden sposób na poprawność działania systemów nadrzędnych i podrzędnych.

2.2 Moduł eksploracji danych procesowych

Moduł eksploracji danych procesowych ma na celu pełniejsze wykorzystanie zasobów informacji zawartych w bazie czasu rzeczywistego i bazach archiwalnych systemu sterowania. Komputerowe systemy nadzorowania procesów SCADA rejestrują synchronicznie zmienne procesowe ciągle z dużą częstością (na ogół co 1s.) oraz asynchronicznie informacje o istot-

nych zdarzeniach procesowych. Dane te są wykorzystywane do wizualizacji procesu, rzadziej i w niewielkim zakresie czasowym – do analiz statystycznych (pakiety *Statistical Process Control*) oraz sporadycznie – do analiz diagnostycznych w trybie off-line (w przypadku wystąpienia poważniejszych nieprawidłowości) (1).

W chwili obecnej istnieje wiele metod zaawansowanej, algorytmicznej analizy dużych zbiorów danych (tzw. drążenie danych i odkrywanie wiedzy – ang. *Data Mining and Knowledge Discovery*), które są coraz powszechniejszym narzędziem wspomagania zarządzania, diagnostyki medycznej, itp. Są one ukierunkowane na agregację informacji poprzez poszukiwanie skupień (grupowanie obiektów lub sytuacji podobnych), klasyfikację, segmentację szeregów czasowych, wykrywanie danych nietypowych (detekcja zdarzeń), a następnie modelowanie procesów (drzewa decyzyjno-regresyjne, ang. *decision-regression trees*), diagnostykę, syntezę reguł obsługi zdarzeń (np. analiza koszykowa) (2).

W przypadku systemów sterowania wykorzystywane bazy danych są homogeniczne, co ułatwia zadanie eksploracji i sprowadza je głównie do wykorzystania algorytmów statystycznej analizy danych, segmentacji szeregów czasowych, rozpoznawania obrazów (grupowanie, klasyfikacja, detekcja anomalii) i modelowania matematycznego.

W ramach modułu eksploracji danych procesowych realizowane są następujące zadania:

I. Inteligentna identyfikacja modeli statycznych z selekcją danych (3), (4)

- a) segmentacja szeregów czasowych, wykrywająca okresy stacjonarności z wykorzystaniem metod największej wiarygodności oraz oryginalnych filtrów wykorzystujących wieloaspektowe testy statystyczne
- b) detekcja stanów stacjonarnych instalacji i identyfikacja opóźnień w torach wejścia/wyjścia (na podstawie kompleksowej analizy wyników segmentacji), weryfikacja przydatności i rejestracja danych uśrednionych oraz ich parametrów statystycznych
- c) grupowanie i klasyfikacji punktów pracy na podstawie wyników segmentacji i innych dostępnych danych
- d) redukcji liczby istotnych wejść uogólnionych metodą analizy komponentów głównych
- e) identyfikacja modeli regresyjnych, ich walidacja oraz grupowanie
- f) modelowanie nieparametrycznych, wielowymiarowych zależności (przeznaczonych do optymalizacji receptur, estymacji złożonych wskaźników jakości produkcji w poszczególnych klasach punktów pracy, itp.)
- g) regresja logistyczna do prognozowania prawdopodobieństw warunkowych wyjść dyskretnych (w szczególności dla potrzeb kontroli jakości wyrobów) na podstawie wartości wejść ciągłych i dyskretnych (obciążenie instalacji, skład surowca, dostawca, wykonawca, kod sytuacji procesowej) i odpowiadających im klas jakościowych wartości najważniejszych wyjść (klasy typu: produkcja trafiona/nietrafiona, wyrób dobry/wadliwy/reklamowany, itp.)

II. Identyfikacja dynamiczna obiektów jednowymiarowych liniowych (5)

Zadanie to wykorzystuje wyniki procedur zadania I (segmentacji, ortogonalizacji, analizy istotności czynników zależności regresyjnych) w następujących algorytmach:

- a) doboru (rejestracji) danych do identyfikacji modeli dynamicznych, poprzez analizę istotności pobudzeń obiektu w okresach niestacjonarności poszczególnych wejść i wyjść oraz rejestracji ich wzajemnych opóźnień, z uwzględnieniem wyników klasyfikacji punktów pracy
- b) identyfikacji modeli typu ARMAX i ARIMAX, w tym z nieliniową częścią statyczną

- (modele Hammersteina) dla poszczególnych klas punktów pracy
c) weryfikacji uzyskanych modeli w oparciu o opracowane reguły akceptacji modeli

III. Analiza zdarzeń w szeregach zmiennych procesowych

Zadanie to składa się z procedur wieloaspektowej analizy residuów segmentacji² (dla wejść) oraz modeli procesu (dla wyjść) wykorzystujących metody statystyczne i widmowe do wykrywania nietypowych odchyłek (zdarzeń procesowych), przewidywania istotnych zmian parametrów statystycznych szeregów czasowych oraz weryfikacji adekwatności modeli regresyjnych (z wykorzystaniem oryginalnych, uogólnionych metod stosunku funkcji wiarygodności LR (6) i transformacji falkowych (7)). Wyniki detekcji będą sygnalizowane w ramach monitoringu procesu, a także będą służyć do uruchamiania procedur adaptacji modeli (8).

IV. Zaawansowana analiza diagnostyczna

Zadanie to wykorzystuje wyniki zadań I–III w celu prowadzenia kompleksowej analizy diagnostycznej obiektu sterowania i całego systemu produkcyjnego. Zawiera algorytmy obserwacji stanu i identyfikacji parametrów w oparciu o modele procesów. Można je również wyposażyć w algorytmy klasyfikacji sytuacji procesowych, oparte na analizie komponentów głównych (PCA). Działanie tego pakietu pozwoli na eliminację inflacji alarmów oraz agregację informacji o efektywności sterowania umożliwiającą konstrukcję prostych reguł (tablic decyzyjnych) wykrywania i obsługi niesprawności procesów (w szczególności sytuacji awaryjnych) (9).

2.3 Moduł symulatora dynamicznych procesów nieliniowych

Dla wielu procesów ciągłych istnieje możliwość skonstruowania teoretycznych modeli przyczynowo-skutkowych w postaci skończonego wymiarowego układu równań stanu i wyjść. Daje to możliwości precyzyjnej symulacji procesu w czasie rzeczywistym (np. dla potrzeb diagnostyki, adaptacji ograniczeń alarmowych), algorytmicznej adaptacji modeli nieliniowych przez ich aproksymację zależnościami liniowymi na podstawie symulowanych odpowiedzi na określone wymuszenia, a także prowadzenia symulacyjnych analiz konsekwencji stosowania różnych scenariuszy sterowania, czy analiz Monte-Carlo wrażliwości procesu na różne zakłócenia losowe.

Modele teoretyczne w przestrzeni stanu są w zdecydowanej większości przypadków nieliniowe. Ich implementacja wymaga zatem opracowania dedykowanych procedur obliczania pochodnych stanu i wartości wyjść, a także dedykowanych metod wyznaczania stanów równowagowych. Prototypy takich procedur mogą być przygotowane w środowisku MATLAB-SIMULINK lub Mathematica, ale docelowo powinny być zakodowane w kompilowanym języku proceduralnym (np. C lub C++) i umieszczone w środowisku obliczeniowym systemu sterowanie (dostęp do danych procesowych, automatyczna adaptacja do zmieniającej się struktury powiązań podprocesów). Pozwala to wyeliminować konieczność zakupu licencji pakietu MATLAB (na ogół nieprzydatnego dla użytkownika końcowego) i przyspiesza obliczenia (szczególnie w wielowariantowych badaniach symulacyjnych Monte-Carlo). Kodowanie takich procedur w środowisku MATLAB wiąże się z dużym ryzykiem błędów (często

² Szeregi czasowe są poddawane segmentacji, mającej na celu wyznaczenie okresów stacjonarności (zadanie Ia) a następnie na podstawie residuów (różnic między sygnałem zarejestrowanym, a odpowiednią zmienną, uzyskaną analitycznie na podstawie modelu) obliczanych dla poszczególnych segmentów, konstruowany jest sygnał diagnostyczny. Istotność zmian w tym sygnale, świadcząca o wystąpieniu zdarzenia nietypowego, jest analizowana z wykorzystaniem hipotez statystycznych i metod widmowych (transformata falkowa).

trudnych do wykrycia w tym środowisku), które muszą być wyeliminowane na etapie testowania pakietu symulacyjnego w docelowym środowisku obliczeniowym.

Na pakiet symulatora dynamicznego składają się następujące elementy:

- a) moduł zarządzający (komunikacja z systemem sterowania, w tym dostęp do danych, koordynacja obliczeń)
- b) interfejs operatorski umożliwiającego konfigurację modelu, weryfikację poprawności merytorycznej oprogramowania, generowanie scenariuszy sterowania, zlecanie zadań obliczeniowych off–line, uruchamianie symulacji w czasie rzeczywistym
- c) biblioteki uniwersalnych procedur do:
 - generowania standardowych przebiegów czasowych wejść (skok jednostkowy, sygnały losowe, harmoniczne, itp.)
 - rozwiązywania układów równań różniczkowych,
 - rozwiązywania układów równań algebraicznych dla stanów równowagowych,
 - linearyzacji metodą Taylora i metodą aproksymacji odpowiedzi skokowych,
 - obserwacji stanu na podstawie modeli zlinearyzowanych
- d) biblioteki zawierające zwarte zestawy dedykowanych procedur modelu o dowolnych powiązaniach wzajemnych (dołączanych oddzielnie dla każdego modelowanego procesu, tj. dla każdego układu równań różniczkowych i równań wyjść)

Interfejs b) powinien zawierać m.in. procedury ekspertowej weryfikacji poprawności merytorycznej modelu, tj. poprawności powiązań równań modelu, prawidłowości specyfikacji źródeł danych, poprawności komunikacji z bazą danych systemu. Umożliwi to stosunkowo łatwe wyeliminowanie błędów merytorycznych oprogramowania przed testami obiektowymi.

System umożliwia łatwe dołączanie bibliotek (d) dla konkretnego procesu i skonfigurowanie ich powiązań z modelami innych procesów. Pozwoli to na symulację złożonych wielopoziomowych procesów, a tym samym ułatwi m.in. syntezę modeli uproszczonych dla potrzeb sterowania statycznego i dynamicznego (aproksymacja zależności równowagowych, aproksymacja odpowiedzi skokowych, konstrukcja odpornych modeli liniowych w przestrzeni stanu).

Moduł uruchomiony w trybie off–line może być także wykorzystywany w trybie on–line (symulacja w czasie rzeczywistym).

Pakiet mógłby również być konfigurowany jako niezależny system do symulacji złożonych układów technicznych, skończone wymiarowych (m.in. dla dyskretyzowanych, przestrzennie prostszych układów o parametrach rozłożonych).

2.4 Niestandardowe algorytmy regulacyjne

Wieloletnie badania nad syntezą złożonych układów regulacji, w tym wielopoziomowych kaskad regulatorów jednopętlowych (SISO) i regulatorów wielowymiarowych, a w szczególności jedno i wielowymiarowej regulacji predykcyjnej obiektów liniowych i nieliniowych (10) (11), wskazują na ewidentne korzyści jakie może dać wykorzystanie tej nowoczesnej techniki regulacyjnej w przemyśle chemicznym, metalurgicznym, w ciepłownictwie, biotechnologii i innych (poprawa jakości i elastyczności sterowania, minimalizacja strat związanych ze zmianami punktu pracy, zwiększenie odporności układu sterowania) (12), (13).

W związku z powyższym, omawiany system zostanie wyposażony w następujące algorytmy:

- a) regulacji predykcyjnej obiektów liniowych bez ograniczeń w tzw. postaci analitycznej DMC (*ang.* Dynamic Matrix Control)

- b) uogólnionej regulacji predykcyjnej bez ograniczeń, z elastycznym kwadratowym wskaźnikiem jakości
- c) regulacji predykcyjnej z ograniczeniami i kwadratowym wskaźnikiem jakości
- d) regulacji predykcyjnej z ograniczeniami i liniowym wskaźnikiem jakości
- e) nadzorowania jakości sterowania i adaptacji modeli matematycznych

Procedury (a-d) wykorzystują modele matematyczne dynamiki procesu identyfikowane w module eksploracji danych procesowych przez zadanie 1, natomiast w procedurach e) będą wykorzystane wyniki analiz prowadzonych przez procedury zadania 4 modułu eksploracji danych procesowych.

Ponadto, do planowanego pakietu regulacji powinny być dołączone procedury obliczania nastaw regulatorów jednopętlowych wg różnych kryteriów, z wykorzystaniem prostych modeli dynamiki procesu oraz interfejsy operatorskie ułatwiające konfigurację złożonych układów regulacji (wielopoziomowe kaskady, zintegrowane układy wielowymiarowe) oraz kontrolę poprawności ich pracy.

2.5 Moduł optymalizacji procesów

Bardzo istotne, z punktu widzenia zmniejszania kosztów produkcji, procedury optymalizacji będą umożliwiały dobór sterowania nadrzędnego, realizującego utrzymanie wskaźników jakości procesu na wartościach ekstremalnych, w warunkach zmiennych parametrów procesu lub zakłóceń (mierzonych lub estymowanych) (14). Moduł będzie zintegrowany z modulem eksploracji danych procesowych i modulem symulacji. W szczególności, moduł optymalizacyjny umożliwia:

- zdefiniowanie lub wybór wskaźników jakości i wskazanie zmiennych decyzyjnych, dla modeli zidentyfikowanych z wykorzystaniem narzędzi opracowanych w ramach modułu eksploracji danych procesowych i symulowanych z wykorzystaniem narzędzi, opracowanych w ramach modułu symulatora.
- zdefiniowanie ograniczeń procesu, z ich klasyfikacją i skalowaniem
- wyliczanie wartości wskaźników jakości i ograniczeń w punktach pracy procesu a także aproksymację składowych gradientów i wskaźników szacujących stopień spełnienia ograniczeń procesowych
- przeprowadzenie poszukiwania wartości zmiennych decyzyjnych z użyciem efektywnych numerycznie metod optymalizacji
- realizację procedur monitorujących, umożliwiających weryfikację poprawności uzyskiwanych wyników, np. graficznej ilustracji poprawy wskaźnika jakości, analizy powtarzalności rozwiązań, badanie wrażliwości na zmiany parametrów modelu, analiza poprawności komunikacji z bazą danych systemu.

Do tego modułu także odnoszą się uwagi dotyczące potencjalnego wykorzystania pakietów Matlab i Mathematica, sformułowane w roz. 2.3.

3 Podsumowanie

W pierwszej części artykułu przedstawiono koncepcję Zintegrowanego Systemu Sterowania Produkcją INSTEPRO wykorzystującego zaawansowane osiągnięcia teorii sterowania. Opisano architekturę takiego systemu, bazującą na niezależnych, komunikujących się ze sobą modułach, realizujących określone zadania.

W drugiej części artykułu omówiono moduły systemu wraz ze szczegółowym opisem ich funkcjonalności i stosowanych technik, wykorzystujących obecny stan wiedzy na temat zaa-

wansowanych metod sterowania. Taki wybór modułów zapewni według autorów wymaganą użyteczność całego systemu dla przedsiębiorstw produkcyjnych.

4 Bibliografia

1. **Oakland John.** *Statistical Process Control.* Oxford : Butterworth-Heinemann, 2003.
2. **Han Jiawei i Kamber Micheline.** *Data mining: concepts and techniques.* San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
3. **Byrski Witold.** *Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych.* Kraków : Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, 2007.
4. **Byrski Witold i Duda Jan T.** Problemy optymalizacji on-line procesów technologicznych z wykorzystaniem modeli regresyjnych. *Archiwum Automatyki i Telemekhaniki.* 1989, Tom XXXIV, 1-2, strony 115-120.
5. **Byrski Witold i Fuksa Stanisław.** Optimal identification of continuous systems and a new fast algorithm for on-line mode. *SYSID 2000 : Symposium on System Identification,* 21–23 June 2000.
6. **Basseville Michèle i Nikiforov Igor V.** *Detection of Abrupt Changes - Theory and Application.* Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall, Inc., 1993.
7. **Klemiato Maciej.** *Analiza falkowa w diagnostyce układów regulacji.* Łągów Lubuski : Diagnostyka procesów przemysłowych, V krajowa konferencja naukowo-techniczna, 17–19 września 2001. ISBN 83-85911-77-4.
8. —. Detekcja zmian w szeregach czasowych za pomocą transformaty falkowej. *PAR.* 2009, 12.
9. **Korbicz Józef, Patan Krzysztof i Kowal Marek.** *Diagnostyka procesów i systemów Tom 1-2.* Warszawa : Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, 2007.
10. **Woś Adam i Duda Jan T.** *Sterowanie predykcyjne z liniowym wskaźnikiem jakości.* Opole : XIII krajowa konferencja automatyki , 21–24 września 1999.
11. —. *Liniowa regulacja predykcyjna układów wielowymiarowych z ograniczeniami wejść i wyjść.* Zielona Góra : XIV krajowa konferencja automatyki , 24–27 czerwca 2002.
12. **Grega Wojciech i inni.** [red.] Findeisen W. *Automatyka i systemy informacyjno-decyzyjne, kierunki badań i rozwoju: oprac. zbiorowe pod red. Władysława Findeisena.* Warszawa : Oficyna wyd. Politechniki Warszawskiej, 2001.
13. **Duda Jan T.** *Modele matematyczne, struktury i algorytmy nadrzędnego sterowania komputerowego.* Kraków : AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2003.
14. **Grega Wojciech, Byrski Witold i Turnau Andrzej.** Zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnałów, cyfrowego sterowania i optymalizacji w systemach dynamicznych. *Pomiary, Automatyka, Kontrola.* 2007, 3, strony 9-25.