

Rozdział II: Innowacje procesowe. Wytwarzanie produktów podstawowych i specjalistycznych

2.1. WIELOKRYTERIALNA OCENA JAKOŚCI REGULACJI PROCESU WYTWARZANIA AMONIAKU

Krzysztof Dziuba¹, Radosław Góra¹, Paweł D. Domański², Maciej Ławryńczuk²

¹Grupa Azoty Zakłady Azotowe „Puławy” S.A.

²Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska

1. Wstęp

W pracy opisano studium oceny aktualnie pracujących systemów automatyki V linii produkcyjnej amoniaku w Zakładzie Amoniaku Grupy Azoty Zakłady Azotowe „Puławy” S.A. Analiza została przeprowadzona w ramach projektu „Opracowanie i wdrożenie zaawansowanego systemu sterowania (APC) dla instalacji wytwarzania amoniaku”, w ramach programu sektorowego „INNOCHEM” finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). Analizy dokonano przed wdrożeniem automatyki zaawansowanej oraz optymalizacji procesu. Studium obejmowało: analizę jakości oraz potencjalnych możliwości urządzeń obiektowych (system automatyki, układy sterowania, elementy wykonawcze i pomiarowe). W szczególności, przeprowadzono wielokryterialną analizę kilkudziesięciu pętli regulacji PID przy wykorzystaniu metod statystycznych i analizy fraktalnej. Analizowane były wszystkie pętle jednopunktowe oraz kaskadowe pracujące w trybie automatycznym podczas codziennej normalnej pracy instalacji. Na podstawie badań sformułowano wnioski i zalecenia dotyczące dalszych prac polegających na: ewentualnej modyfikacji wybranych pętli regulacji, dostrojeniu wybranych regulatorów oraz weryfikacji wskazanych urządzeń pomiarowych i wykonawczych. Dzięki proponowanym działaniom możliwe będzie pełne wykorzystanie potencjału dynamicznego automatyki bazowej oraz efektywne wdrożenie algorytmów sterowania zaawansowanego i optymalizacji na instalacji produkcyjnej amoniaku.

1.1. Cele i zakres analizy

Cele analizy były następujące:

- a) weryfikacja jakości pracy podstawowych urządzeń wykonawczych (zawory, kłapy, itd.) na linii wytwarzania amoniaku,
- b) weryfikacja i walidacja krytycznych urządzeń pomiarowych,
- c) ocena wpływu (analiza wrażliwości) urządzeń obiektowych na jakość regulacji oraz docelową strukturę uwzględniającą automatykę zaawansowaną,
- d) ocena dynamicznej jakości pracy pętli sterowania w postaci różnych wskaźników oceny,

- e) przygotowanie dokumentu projektowego prezentującego wyniki przeprowadzonych analiz oraz wytyczne odnośnie potencjalnych dalszych działań naprawczych urządzeń obiektowych znajdujących się w zakresie studium.

Zakres analizy objął:

- a) analizę historycznych danych obiektowych przechowywanych w systemie automatyki,
- b) rozmowy z operatorami, inżynierami automatykami oraz kadrą inżynierską odpowiedzialną za utrzymanie parametrów procesowych, elementów wykonawczych i pomiarowych,
- c) analizę struktur oraz filozofii regulacji istniejącego systemu sterowania,
- d) przeprowadzenie oceny urządzeń krytycznych dla pracy instalacji i jej optymalizacji,
- e) wykonanie obliczeń i analiz zebranych danych,
- f) opracowanie raportu prezentującego wyniki.

Na podstawie uzyskanych informacji i danych opracowano:

- a) analizę i ocenę przydatności oraz stanu urządzeń pomiarowych,
- b) analizę jakości pracy układów regulacji,
- c) propozycje postępowania dla dalszych kroków oraz oszacowanie wyników możliwych do osiągnięcia po wdrożeniu zmian w układach automatyki bazowej i zastosowaniu automatyki zaawansowanej (ang. Advanced proces Control – APC).

1.2. Realizacja projektu

Studium zostało przeprowadzone przez specjalistów z zakresu zaawansowanych algorytmów sterowania z Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Studium oceny zostało wykonane w dwóch fazach. Pierwsza faza to wykorzystanie historycznych zapisów z systemów automatyki oraz danych aktualnie zebranych wg zaleceń inżynierów wykonujących opracowanie. Faza ta była realizowana przez trzyosobowy zespół projektowy w dniach 5-6 czerwca 2017 roku. Podczas wizyty obiektowej zostały szczegółowo przeanalizowane istniejące pętle regulacji pracujące w trybie automatycznym. Równocześnie zostały zebrane dane procesowe obejmujące analizowane punkty pomiarowe, elementy wykonawcze oraz pętle regulacji. W celu zapewnienia wystarczającej dokładności analizy należało zmodyfikować zakresy deadbandów systemu archiwizacji. Jednocześnie były przeprowadzone rozmowy z operatorami oraz kadrą inżynierską.

Faza druga to przeanalizowanie danych i przygotowanie opracowania w postaci raportu. Działania te były przeprowadzone poza obiektem. Po przygotowaniu raportu i jego dostarczeniu wyniki prac zostały zaprezentowane i wspólnie przedyskutowane.

Podczas wykonywania studium nie były dokonywane żadne zmiany w aktualnych układach regulacji i sterowania. Przykładowa grafika z systemu sterowania analizowanej instalacji przedstawiona jest na rys. 1.

2. Opis instalacji

Gaz syntezowy niezbędny do produkcji amoniaku pozyskuje się w oparciu o proces półspalania węglowodorów zawartych w gazie ziemnym z zastosowaniem powietrza atmosferycznego i czystego tlenu. Przygotowanie gazu syntezowego do syntezy amoniaku składa się z następujących procesów:

- a) konwersja gazu ziemnego (półspalanie),
- b) konwersja tlenku węgla (wysoko- i niskotemperaturowa konwersja CO),
- c) usuwanie CO₂ z gazu procesowego (proces Benfielda),
- d) usuwanie pozostałości CO i CO₂ z gazu procesowego (mycie miedziowe).

Synteza amoniaku jest procesem równowagowym - gaz opuszczający reaktor syntezy zawiera kilkanaście procent amoniaku. Reakcja syntezy amoniaku przebiega na katalizatorze żelazowym, ciepło reakcji wykorzystywane jest do produkcji pary oraz podgrzania gazu wchodzącego do reaktora syntezy. Gaz opuszczający reaktor syntezy przepływa przez szereg wymienników ciepła celem wychłodzenia i odzysku ciepła, amoniak wykraplaany jest ze strumienia gazu w separatorze, a

- Min: wartość minimalna szeregu czasowego,
 - Max: wartość maksymalna szeregu czasowego,
 - Średnia: wartość średniej arytmetycznej szeregu czasowego,
 - Mediana: wartość mediany szeregu czasowego,
 - Odchylenie standardowe szeregu czasowego. Wartość ta świadczy o rozrzucie danych od wartości średniej. Większe wartości oznaczają znaczniejsze fluktuacje wielkości. Zatem im odchylenie standardowe jest mniejsze, tym mniejsze są wahania danej wielkości i jej właściwości dynamiczne są lepsze.
 - Skupienie (Kurtoza) szeregu czasowego. Jest to kolejna miara skupienia danych szeregu czasowego. Wskaźnik informujący o tym, czy dany rozkład jest wysmukły, czy też spłaszczony. Kurtoza jest statystyką wyższego rzędu i służy do określenia stopnia koncentracji wartości zmiennej wokół średniej. Im większa wartość tym rozkład jest bardziej spłaszczony.
 - Asymetria (skośność) szeregu czasowego. Jest to miara kształtu rozkładu szeregu czasowego i również jest statystyką wyższego rzędu. Wskaźnik określa stopień asymetrii rozkładu wokół średniej. Zawiera on informacje o możliwych różnicach pomiędzy dodatnimi i ujemnymi odchyleniami od wartości średniej. Powszechnie stosowany jest dla wykazania czy rozkład wyników jest symetryczny (normalny). Dla rozkładu symetrycznego (normalnego) wartość tego wskaźnika jest równa zero. Dla rozkładu skośnego ujemnie (wartość mniejsza od zera) przewaga liczebności występuje wokół wysokich wartości zmiennej. Dla rozkładu skośnego dodatnio (wartość większa od zera) przewaga liczebności występuje wokół niskich wartości zmiennej. Z punktu widzenia zmiennych procesowych oczekiwana jest zerowa miara skośności.
3. Dla układów pracujących w trybie AUTO został wyznaczony uchyb regulacji. Dla uchybu zostały wyznaczone te same co dla zmiennej procesowej podstawowe statystyki rozkładu normalnego. Dodatkowo graficznie pokazany został przykładowy trend. Wyznaczony został histogram uchybu regulacji wraz z wykresami funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładu normalnego oraz rozkładu normalnego uchybu.
 4. Przebiegi czasowe dla wszystkich zmiennych wraz z ich histogramem oraz nałożonymi funkcjami gęstości prawdopodobieństwa dla wybranych rozkładów:
 - a. rozkładu normalnego wyznaczonego metodami klasycznymi,
 - b. rozkładu normalnego wyznaczonego za pomocą metod odpornościowych (odpornościowe rozkłady Hubera), zwanego krótko rozkładem Hubera,
 - c. rozkładu podwójnie eksponentyjnego Laplace'a,
 - d. grubo-ogonowego rozkładu Cauchy'ego.
 5. Wyznaczenie parametrów funkcji rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla trzech rozkładów: normalnego Gaussa, dwu-wykładniczego oraz grubo-ogonowego Cauchy'ego. Są one typowe i obejmują możliwe scenariusze. Jednocześnie parametry dla rozkładu normalnego są wyznaczane przy pomocy statystyk odpornościowych, których zaletą polega na tym, że są one w stanie pominąć efekty wartości odstających (ang. *outliers*) odpowiedzialnych za efekt grubych ogonów.
 Analiza własności grubo-ogonowych jest celowa. Literatura wskazuje, że są one efektem wewnętrznych korelacji często pojawiających się ze zmiennym opóźnieniem. Z punktu widzenia automatyki oznacza to istnienie sygnałów zakłóceń. Możemy próbować ten wpływ zniwelować przy pomocy odsprężania zakłóceń wykorzystując bloki typu *feedforward*. Zatem istnienie grubych ogonów skazuje na konieczność sprawdzenia istnienia potencjalnych zakłóceń oraz weryfikacji możliwości ich odsprężnienia.
 6. Charakterystyki X-Y zależności CV od MV. W celach poglądowych na chmurę punktów nałożona jest aproksymacja (regresja) za pomocą wielomianu pierwszego lub drugiego stopnia.
 7. Wykresy przeskalowanego zasięgu R/S wykorzystywane do wyznaczenia współczynników persystencji w postaci wykładnika Hursta oraz punktu przełamania (ang. *crossover*). Analiza wykresów R/S pokazuje często istnienie wielokrotnych wykładników Hursta dla różnych

horyzontów czasowych pamięci układu. Z punktu widzenia dynamicznej jakości sterowania istotny jest jedynie pierwszy (ten o najkrótszej pamięci) wykładnik. On został wykorzystany jako wskaźnik jakości dostrojenia. Badania pokazują, że jest on dobrą miarą jakości sterowania dla regulatorów PID [4]. Okazuje się, że wartości wykładnika Hursta bliskie wartości 0.5 oznaczają poprawne (neutralne) zestrojenie pętli, podczas gdy wielkości antypersystentne ($H < 0.5$) oznaczają agresywne zestrojenie pętli a wielkości persystentne ($H > 0.5$) wskazują na zbyt powolne zestrojenie.

Przegląd wszystkich pętli sterowania zdecydowanie pokazał dobre działanie układów regulacji. Żadna z pętli nie odbiega od średniej w kierunku złej jakości. Niemniej widać konieczność przeprowadzenia rewizji części z pętli w celu dalszej poprawy ich działania oraz pełnego potencjału automatyki bazowej.

Tabela 1. Statystyka przykładowej pętli regulacji ciśnienia XX

Statystyka wartości zadanej: – Min = 2.744; Max = 2.806; Średnia = 2.780; Mediana = 2.780 – Odchylenie standardowe = 0.001; Kurtoza = 327.871; Skośność = -6.703
Statystyka zmiennej sterowanej (CV): – Min = 2.707; Max = 2.817; Średnia = 2.780; Mediana = 2.780 – Odchylenie standardowe = 0.007; Kurtoza = 22.938; Skośność = -1.946
Statystyka uchybu regulacji: – Min = -0.037; Max = 0.073; Średnia = 0.000; Mediana = 0.000 – Odchylenie standardowe = 0.007; Kurtoza = 23.691; Skośność = 1.894
Statystyka zmiennej sterującej (MV): – Min = 11.836; Max = 22.697; Średnia = 13.610; Mediana = 13.479 – Odchylenie standardowe = 1.104; Kurtoza = 16.400; Skośność = 2.620
Statystyki odpornościowe uchybu regulacji: – Średnia (logistyczna) = -0.000 – Odchylenie standardowe (logistyczne) = 0.005
Parametry rozkładu: – Cauchy'ego: $x_0 = 0.000$, $\gamma = 0.003$ – Laplace'a: $\mu = 0.000$, $b = 0.004$
Parametry fraktalne: – $H = 0.708$ – dla dwóch złamań: $H_0 = 0.867$, $H_1 = 0.595$, crossover = 60.7 [min] – dla trzech złamań: $H_0 = 0.818$, $H_1 = 0.810$, $H_2 = 0.532$, crossover1 = 26.0 [min], crossover2 = 151.7 [min]

Jako przykład jednopętlowego układu sterowania omówiona jest pętla ciśnienia XX. W tabeli 1 podano parametry statystyczne charakteryzujące wybraną pętlę. Na wykresach (rys. 2) przedstawiono sygnał sterowany oraz sterujący, zaś na rys. 3 zaprezentowany jest uchyb regulacji oraz jego histogram. Ostatni z wykresów (rys. 4) prezentuje wykres przeskalowanego zasięgu dla uchybu z potrójnym wykładnikiem Hursta oraz wykres radarowy jakości regulacji. Wykres radarowy stanowi skonsolidowany rysunek prezentujący na jednym wykresie różne kryteria oceny jakości sterowania, tzn.:

- wartość bezwzględną średniej z uchybu (dobra pętla powinna mieć wartość zero – wartość na obwodzie),
- wartość bezwzględną skośności uchybu (dobra pętla powinna mieć wartość zero – wartość na obwodzie),
- odchylenie standardowe σ (im mniejsze tym lepsze – na obwodzie zero),

-
- Figure 10 consists of two side-by-side plots. The left plot shows the MV signal (red line) and the subpoint (blue line) over time. The y-axis is labeled 'CV [mm]' and ranges from 2.72 to 2.82. The x-axis is labeled 'time [10^4 sek]' and ranges from 0 to 6. The right plot shows the MV signal (red line) and the MV library (green line) over time. The y-axis ranges from 12 to 22. The x-axis is labeled 'time [10^4 sek]' and ranges from 0 to 6. Both plots show a significant peak in the MV signal around time 3, which is identified as the subpoint in the left plot and the MV library in the right plot.

The left plot displays a time series of a noisy signal (green line) and its average (red line). The x-axis is labeled 'czas [1/12 sek]' and ranges from 0 to 6, with a multiplier of $\cdot 10^{-4}$. The y-axis ranges from -0.03 to 0.07. The right plot shows a histogram of 'uchyby regulacji' (regulation errors) with overlaid probability density functions for Gaussian, Cauchy, Huber, and Laplace distributions. The x-axis ranges from -0.015 to 0.015, and the y-axis, labeled 'liczba zdarzen' (number of events), ranges from 0 to 3000.



Rys. 4. Pętla XX: potrójny wykres przeskalowanego zasięgu R/S dla uchybu regulacji (po lewej) i wykres radarowy jakości regulacji (po prawej)

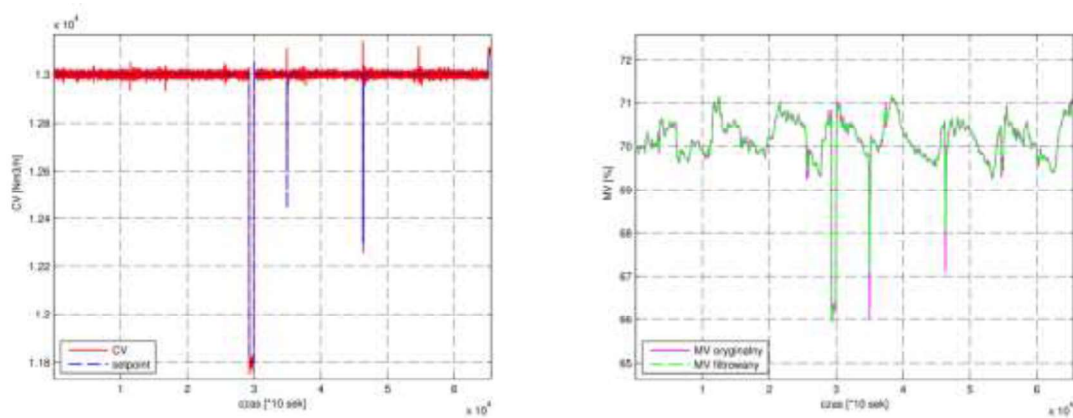
Obserwacje trendów procesowych pokazują, iż pętla XX pracuje relatywnie poprawnie, aczkolwiek widać kilka problemów:

1. Uchyb regulacji jest asymetryczny, co widoczne jest na skośności histogramu, pomimo wartości średniej bliskiej zeru – brak uchybu w stanie ustalonym. Przyczyną może być nieliniowość procesu. Wprowadzenie zmienności parametrów regulatora w zależności od punktu pracy (Gain Scheduling) mogłoby być rozwiązaniem problemu.
2. Widoczny jest charakter grubo-ogonowy histogramu. Może być on spowodowany korelacjami wynikłymi z zakłóceń, które nie są odsprzęgnięte. Należy rozważyć zastosowanie bloków feedforward, jeśli jesteśmy w stanie zidentyfikować i zmierzyć sygnał zakłócający.

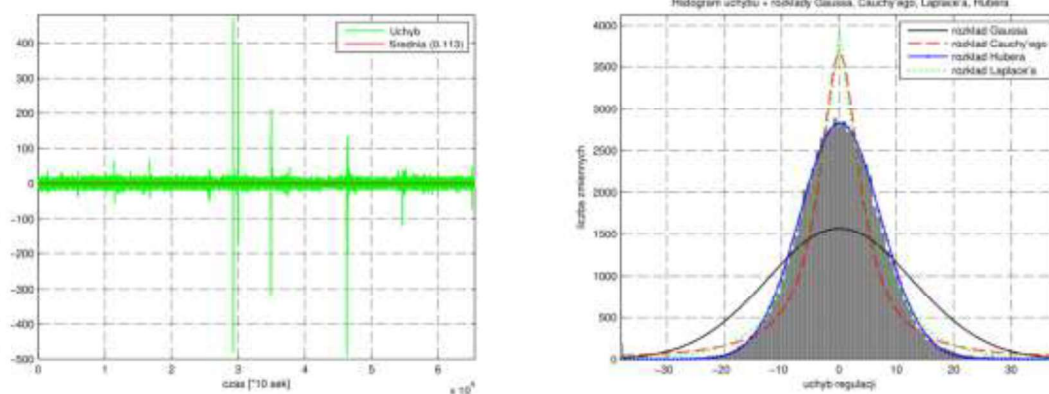
Jako przykład dwupętlowego układu sterowania omówiona jest pętla YY. W tab. 2 podano parametry statystyczne charakteryzujące pętlę. Na wykresie rys. 5 przedstawiono sygnał sterowany sterujący, na rys. 6 pokazano uchyb regulacji i jego histogram, zaś na rys. 7 zaprezentowano potrójny wykres przeskalowanego zasięgu R/S dla uchybu oraz wykres radarowy jakości regulacji.

Tabela 2. Statystyka pętli YY

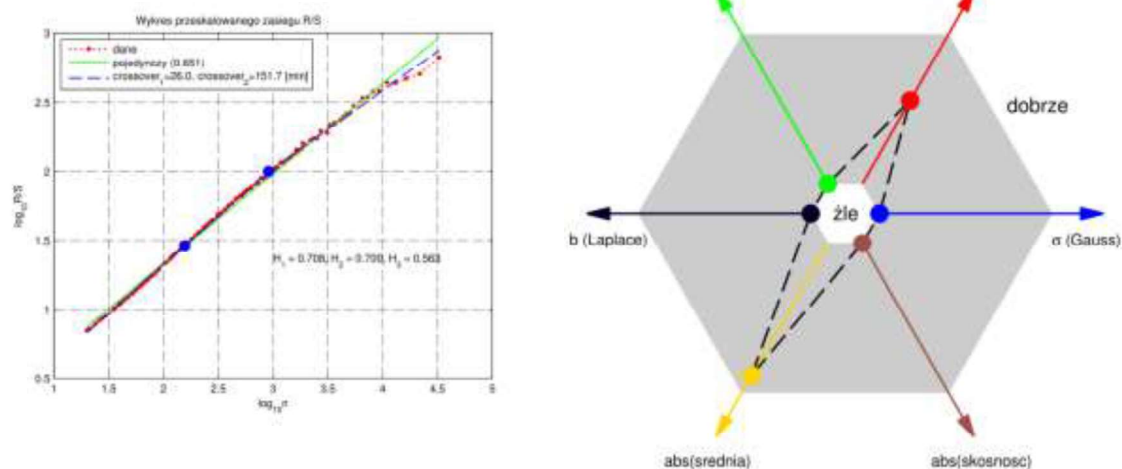
Statystyka wartości zadanej: — Min = 11800.000; Max = 13100.000; Średnia = 12986.733; Mediana = 13000.000 — Odchylenie standardowe = 125.306; Kurtoza = 85.284; Skośność = -9.103
Statystyka zmiennej sterowanej (CV): — Min = 11751.510; Max = 13143.270; Średnia = 12986.620; Mediana = 12999.820 — Odchylenie standardowe = 124.601; Kurtoza = 85.427; Skośność = -9.083
Statystyka uchybu regulacji: — Min = -490.440; Max = 470.700; Średnia = 0.113; Mediana = 0.130 — Odchylenie standardowe = 12.710; Kurtoza = 337.066; Skośność = -6.571
Statystyka zmiennej sterującej (MV): — Min = 65.933; Max = 71.156; Średnia = 70.144; Mediana = 70.151 — Odchylenie standardowe = 0.590; Kurtoza = 22.249; Skośność = -3.197
Statystyki odpornościowe uchybu regulacji: — Średnia (logistyczna) = 0.194 — Odchylenie standardowe (logistyczne) = 7.051
Parametry rozkładu: – Cauchy’ego: $x_0 = 0.111$, $\gamma = 4.329$ – Laplace’a: $\mu = 0.113$, $b = 6355$
Parametry fraktalne: – $H = 0.651$ – dla dwóch złamań: $H_0 = 0.729$, $H_1 = 0.595$, crossover = 60.7 [min] – dla trzech złamań: $H_0 = 0.708$, $H_1 = 0.700$, $H_2 = 0.563$, crossover1 = 26.0 [min], crossover2 = 151.7 [min]



Rys. 5. Pętla YY: sygnał sterowany (po lewej) i sygnał sterujący (po prawej)



Rys. 6. Pętla YY: uchyb regulacji (po lewej) i jego histogram (po prawej)



Rys. 7. Pętla YY: potrójny wykres przeskalowanego zasięgu R/S dla uchybu regulacji (po lewej) i wykres radarowy jakości regulacji (po prawej)

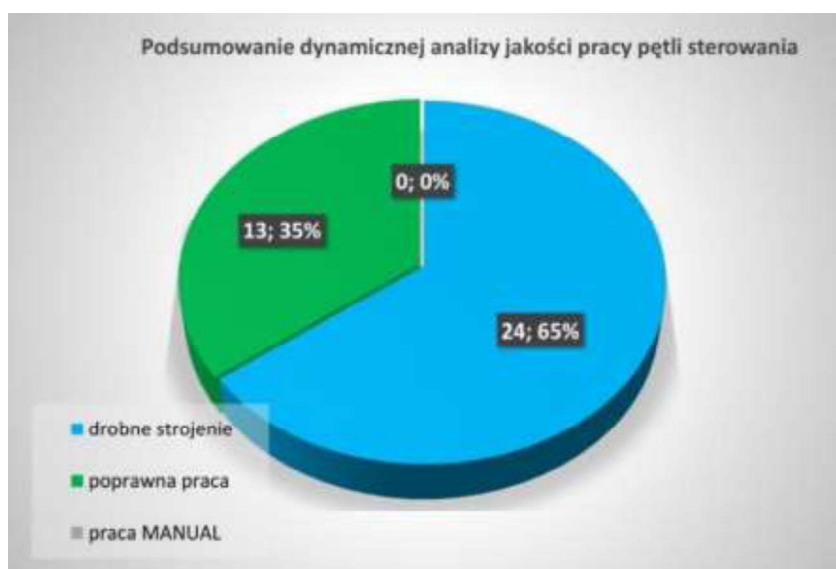
Obserwacje trendów procesowych pokazują, iż pętla YY pracuje poprawnie:

1. Charakter histogramu jest bliski normalnemu rozkładowi Gaussa, co świadczy o dobrze dobranym układzie regulacji.
2. Analiza fraktalna pokazuje, że układ regulacji jest zestrojony neutralnie – poprawnie.

4. Podsumowanie prowadzonych prac

Poniższa lista prezentuje zebranie uwag ogólnych dotyczących wszystkich analizowanych pętli sterowania:

1. analiza pokazuje, iż układ pracuje poprawnie od strony automatyki. Jedynie część z pętli wymaga zweryfikowania, czy też rewizji. Nie jest przewidywana konieczność jakichkolwiek poważnych zmian strukturalnych w automatyce. Na ogólną liczbę **41** analizowanych pętli, które pracują w trybie automatycznym, takie działania sugeruje się przeprowadzić dla **24** pętli (w tym trzech układów kaskadowych), co podsumowano na rys. 8.
2. Analiza właściwości fraktalnych pokazuje, że więcej niż połowa pętli ma charakter persystentny, co oznacza powolną pracę i być może zbyt bezpieczne zestrojenie charakteryzujące się długimi czasami odpowiedzi (ale jednocześnie minimalizowane jest ryzyko przeregulowań). Czternaście pętli jest zestrojonych agresywnie. Natomiast pięć pętli wygląda na zestrojone blisko nastaw neutralnych.
3. Większość z pętli wskazanych jako wymagające uwagi powinna mieć filtr pomiaru zmiennej regulowanej oraz wymaga dostrojenia. Precyzyjne utrzymywanie wartości procesowych wokół zadanych umożliwi odpowiednie podniesienie wartości zadanych (poprawa efektywności wytwarzania) bez negatywnego wpływu na pracę instalacji.
4. Kaskady wymagają weryfikacji struktury, dostrojenia oraz właściwego śledzenia pomiarów a także wykorzystywania odpowiednich wartości strefy nieczułości na wejściu uchybu regulatora.
5. Istnieje dalszy możliwy potencjał poprawy do osiągnięcia poprzez zastosowanie automatyki zaawansowanej typu regulacji predykcyjnej (ang. Model Predictive Control, MPC) [5].
 - Procesy usuwania CO i CO₂ oraz syntezy amoniaku przez swój charakter powinny pozwolić na dalszą poprawę – w tym wypadku przy użyciu automatyki zaawansowanej.
 - W sekcji konwersji gazu ziemnego sytuacja jest trudniejsza, niemniej charakter zmiennych pokazuje, iż automatyka bazowa działa poprawnie co tym samym umożliwia pełne wykorzystanie potencjału wielowymiarowych struktur typu APC.



Rys. 8. Podsumowanie analizy dynamicznej pracy pętli

5. Propozycja działań

Konsekwencją przeprowadzonej analizy jest propozycja przeprowadzenia następujących prac w celu usprawnienia pracy instalacji:

1. Dla pętli wymagających modernizacji sugeruje się:
 - a) Wykonanie szczegółowego projektu modyfikacji struktur sterowania składającego się z dwu podstawowych elementów:
 - Przygotowanie wzorca podstawowej pętli sterowania zgodnego z sugerowaną funkcjonalnością,
 - Przygotowanie projektu modyfikacji strategii sterowania z uwzględnieniem potencjalnych wpięć do APC oraz umożliwienie stopniowego włączania nowych pętli na pracującym obiekcie.
 - b) Systematyczne strojenie oraz załączanie kolejnych pętli węzłów w nowej wersji.
 - c) Po uruchomieniu automatyki bazowej koniecznym jest jej działanie 1-2 miesięczne w celu stabilizacji i dopiero po tym okresie można podjąć dalsze prace związane z APC.
2. Wykonanie ponownego przejrzania wskazanych pętli i dostrojenie tychże układów.
3. Przejrzanie wskazanych urządzeń pomiarowych oraz wykonawczych.
4. Przygotowanie instalacji do zastosowania układów sterowania zaawansowanego typu MPC, poprzez projekt funkcjonalny, modyfikacje w systemie automatyki oraz wpięcia sygnałów z APC.

Proponowana jest struktura warstwowa rozwiązania. Podejście takie pozwoli na funkcjonalne rozdzielanie zadań i celów zapewniając współgranie proponowanego rozwiązania i wykluczając szkodliwe interakcje pomiędzy zarówno warstwami jak i modułami. Analogiczne podejście było już rozważane w literaturze [3] i często jest stosowane w rozwiązaniach praktycznych [1].

W literaturze przedmiotu oraz praktyce przemysłowej istnieją dwie koncepcje stosowania automatyki zaawansowanej dla instalacji wytwarzania amoniaku: układy scentralizowane w postaci pojedynczego regulatora MPC o bardzo dużej wymiarowości oraz układów zdekomponowanych do kilku mniejszych (mniejsza liczba sygnałów MV, CV i DV). Każde z tych podejść ma swoje zalety i wady. Układy scentralizowane są o tyle prostsze, iż w naturalny sposób uwzględniają wewnętrzne korelacje oraz sprzężenia skrośne. Z drugiej strony są trudniejsze w strojeniu. Struktury zdekomponowane umożliwiają prostsze strojenie. Niemniej projekt struktury wymaga znacznie większej uwagi. Kolejną zaletą takiej struktury jest możliwość oddzielnej i niezależnej pracy poszczególnych instancji. Metody i algorytmy wykorzystywane przez owe układy są dobrze znane i są opisane w literaturze [2]. Ostateczna struktura będzie zależała od przyjętej technologii MPC.

Literatura

- [1] P. D. Domanski, S. Golonka, R. Jankowski, P. Kalbarczyk, and B. Moszowski: Control rehabilitation impact on production efficiency of ammonia synthesis installation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(39):10366–10376, 2016.
- [2] A.S. Kumar, Z. Ahmad: Model Predictive Control (MPC) and its current issues in chemical engineering. *Chemical Engineering Communications*, 199, 472-511, 2012.
- [3] H. Manum, S. Skogestad: Self-optimizing control with active set changes. *Journal of Process Control*, 22, 873-883, 2012.
- [4] B. Srinivasan, T. Spinner, and R. Rengaswamy. Control loop performance assessment using detrended fluctuation analysis (DFA). *Automatica*, 48(7):1359–1363, 2012.
- [5] P. Tatjewski: *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.