



Model sterowania procesem eksploatacji złożonego obiektu technicznego

JACEK PAŚ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, jacek.pas@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono model sterowania procesem eksploatacji złożonego obiektu technicznego. W procesie sterowania eksploatacją można wyróżnić dwie grupy ograniczeń — przestrzenne i czasowe. Badania kotłów CO miały na celu określenie podstawowych charakterystyk eksploatacyjnych ze zdalnym, bezprzewodowym sterowaniem wykorzystującym ogólnodostępną sieć transmisji sygnałów GSM.

Słowa kluczowe: eksploatacja, złożony obiekt techniczny, obsługiwane

DOI: 10.5604/01.3001.0009.9489

1. Wstęp

Eksploatacja złożonego obiektu technicznego to jeden proces, a dwa zdarzenia losowe, które obejmują: obsługiwane jako działanie przygotowujące obiekt techniczny do uruchomienia i wykorzystania oraz użytkowanie jako działanie polegające na wykorzystaniu obiektu (urządzenia) zgodnie z jego przeznaczeniem. Warunkiem powstania i przebiegu procesu eksploatacji jest istnienie co najmniej dwóch elementów — przedmiotu eksploatowanego oraz systemu eksploatacji. Zadaniem systemu eksploatacji jest stworzenie najbardziej efektywnych warunków użytkowania obiektu złożonego przy minimalnych nakładach na obsługiwane [3, 5]. Utrzymanie złożonego obiektu technicznego w stanie ciągłej gotowości i sprawności wymaga jego obsługiwania. Sterowanie procesem eksploatacji obejmuje więc dwa działania — sterowanie użytkowaniem i obsługiwaniem. Proces sterowania eksploatacją systemów złożonych można zdefiniować jako możliwość przejścia z jednego do

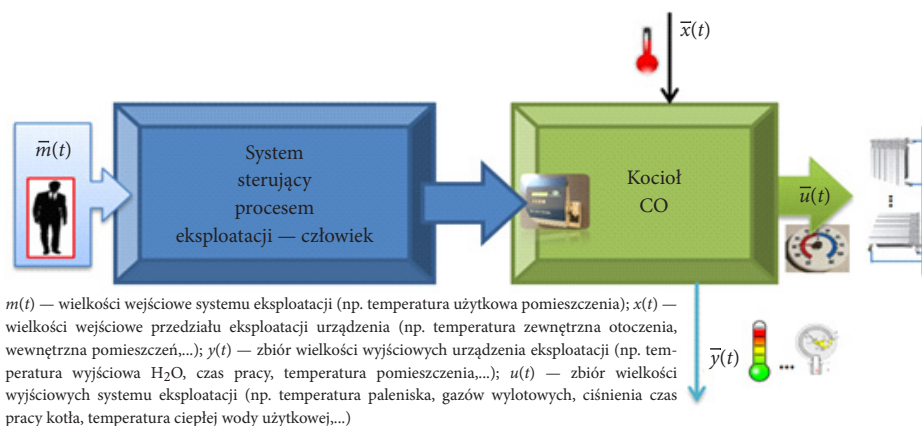
drugiego stanu pracy z n wyróżnionych stanów eksploatacyjnych zgodnie z planem lub algorytmem systemu eksploatacji. W procesie sterowania eksploatacją obiektu złożonego można wyróżnić dwie grupy ograniczeń — przestrzenne i czasowe. Ograniczenia przestrzenne dotyczą np. terenu i miejsca, gdzie złożony obiekt techniczny, w tym przypadku piec CO, jest użytkowany i obsługiwany. Realizacja programu lub algorytmu eksploatacji, związana z realizacją zasilania paliwem i energią elektryczną, bezprzewodowa wymiana informacji telekomunikacyjnych operator-obiekt itd. [1, 2, 9, 10]. Ograniczenia przestrzenne procesu eksploatacji są związane z parametrami fizycznymi otoczenia obiektu technicznego (zasięg sygnału radiowego stacji bazowej telefonii komórkowej, propagacja fali elektromagnetycznej w obiekcie budowlanym, temperatura, wilgotność itd.). Ograniczenia czasowe, w których zmienną niezależną jest czas t lub czas eksploatacji obiektu Y , związane są ze zmianą charakterystyk przedmiotu lub systemu eksploatowanego w funkcji czasu użytkowania i obsługiowania. Algorytm sterowania musi uwzględniać np. proces starzenia kotła CO, zmianę mocy, częstotliwości nadajnika stacji bazowej, warunki propagacji sygnału, lokalne obciążenie sieci GSM, czasy opóźnienia sygnału sterującego.

2. Sterowanie procesem eksploatacji złożonego obiektu technicznego

Analiza procesu eksploatacji złożonych systemów technicznych, w tym urządzenia grzewczego, to szukanie odpowiedzi na dwa podstawowe pytania:

- jak użytkować urządzenie techniczne, aby osiągnąć najlepszy efekt przy niskim nakładzie ekonomicznym — energia, paliwo stałe, gaz, konserwacja itd. oraz odpowiednim poziomie bezpieczeństwa eksploatacji instalacji grzewczej?
- jakie procedury obsługiowania i kiedy należy zastosować w celu przywrócenia wymaganego potencjału eksploatacyjnego urządzenia przy określonym nakładzie finansowym z zachowaniem wymagań technicznych urządzenia [1]?

Każde działanie człowieka powodujące uruchomienie i korzystanie z określonych sił i środków, przejawiające się wytworzeniem nowych wartości, nazywamy procesem eksploatacji. Model funkcjonalny eksploatowanego złożonego systemu technicznego przedstawiono na rysunku 1. Zaprezentowano zasadnicze bloki funkcjonalne oraz występujące relacje informacyjne. Po przetworzeniu sygnału wejściowego w bloku sterowania procesem eksploatacji i uwzględnieniu sygnałów zakłócających, które mogą oddziaływać na sygnał sterujący $m(t)$, otrzymujemy sygnał wyjściowy y , który można opisać za pomocą wektora wyjściowego n wymiarowego [1, 2].



Rys. 1. Model schematu funkcjonalnego systemu eksploatacji kotła CO z uwzględnieniem oddziaływań zewnętrznych sterujących [opracowanie własne]

Sygnał wyjściowy sterujący obiektem technicznym — kotłem CO — uwzględnia charakterystyki przetwarzania systemu, które mogą być liniowe lub nieliniowe w całym zakresie sterowania

$$y = \{y_1; y_2; \dots; y_n\}. \quad (1)$$

Każdy złożony obiekt techniczny musi być zaopatrywany w materiały, informację, energię elektryczną i określone środki techniczne przez system zaopatrywania o określonej charakterystyce [3, 11]. W systemie zaopatrywania występują sygnały wejściowe procesu zaopatrywania v_1, v_2, \dots, v_n oraz sygnały wyjściowe $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, które uwzględniają charakterystykę przetwarzania systemu sterowania. System sterowania eksploatacją wypracowuje sygnały sterujące na podstawie następujących danych [3]:

- przetworzonego sygnału m w bloku sterowania $m = \{m_1; m_2; \dots; m_n\}$, (2)
- sygnału wyjściowego procesu zaopatrywania $\mu = \{\mu_1; \mu_2; \dots; \mu_n\}$. (3)

Sygnał wyjściowy systemu sterowania y stanowi wektor wielkości wyjściowych o następującym zbiorze elementów

$$y = \{y_1; y_2; \dots; y_n\}. \quad (4)$$

Każdy ze składowych wektorów m i y jest funkcją czasu t , czasu eksploatacji Θ oraz parametrów eksploatacji \bar{e} , a więc

$$m_i = m_i \{t, \Theta, e\}, \quad (5)$$

$$y_i = y_i \{t, \Theta, e\}, \quad (6)$$

przy czym $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$.

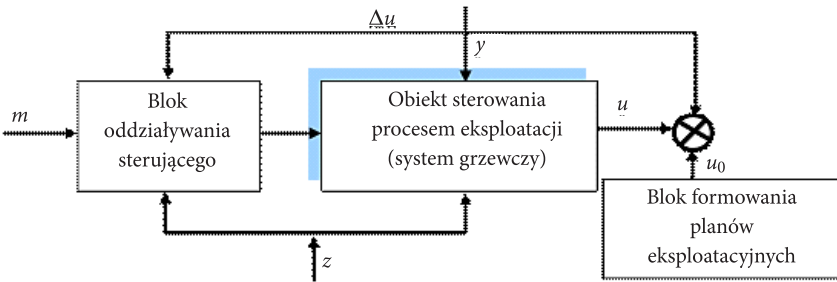
Przebieg procesu eksploatacji zależy również od charakterystyk \bar{r} kotła CO, przetwarzania informacji pierwotnej, np. regulacja temperatury w pomieszczeniu

nr 1 na temperaturę i zużycie czynnika grzewczego oraz parametrów \bar{e} całego systemu eksploatowanego, instalacja CO w budynku. Dlatego w funkcjach opisujących składowe wektorów m_i i y_i mogą wystąpić parametry \bar{r} , wielkości wejściowe x i wyjściowe y_i przedmiotu eksploatowanego, tj. kotła CO. W ogólnym przypadku funkcje 5, 6 mogą przyjąć postać:

$$m_i = m_i \{t, \Theta, e, x, y, r\}, \quad (7)$$

$$y_i = y_i \{t, \Theta, e, x, y, r\}. \quad (8)$$

Zapotrzebowanie na proces eksploatacji jest wypracowywane w warunkach kompromisu między temperaturą wewnętrzną w pomieszczeniach a możliwościami ekonomicznymi i bazą techniczną — możliwości regulacyjne, zanieczyszczenie środowiska itd. całego systemu. Ocena sterowania procesem eksploatacji może być precyzowana na podstawie wielkości Δu jako różnica składowych wektora potrzeb u_0 (temperatura pomieszczeń lub np. wody użytkowej) i wektora faktycznego stanu u (możliwości techniczne kotła CO — np. moc, czas reakcji na zadaną temperaturę, parametry instalacji CO, właściwości energetyczne budynku itd.) [1, 3]. Wykorzystując pojęcie jakości procesu eksploatacji systemu grzewczego (rys. 2), oznaczone przez $J(\bar{e})$, budujemy model oceny według relacji (9).



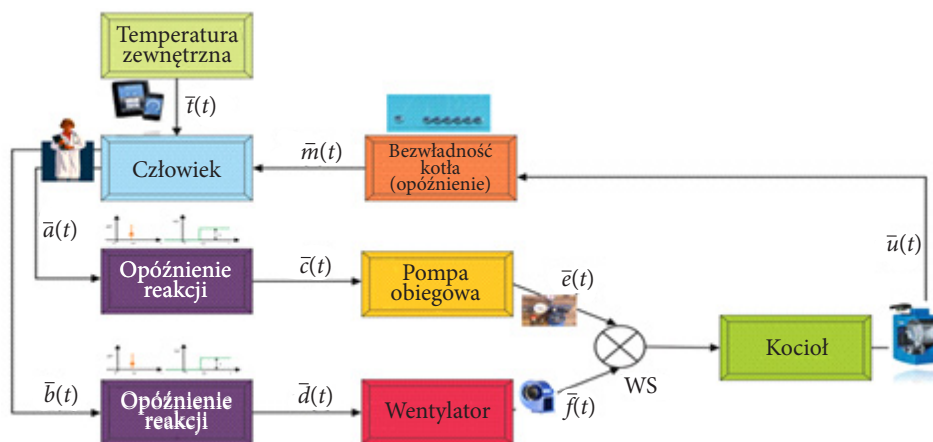
Rys. 2. Model oceny działania systemu eksploatacji, gdzie: Δu — sygnał uchybu (niedokładności procesu eksploatacji); y — charakterystyka przedmiotu eksploatowanego; z — zakłócenia; m — charakterystyka wejściowa sterowania; ρ — funkcja lub wskaźnik wagi zawarty w granicach $0 \leq \rho \leq 1$; χ — wykładnik formy $\chi = \langle \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n \rangle$

$$J(\bar{e}) = \int_0^{\infty} (u_0 - u)^\chi \rho dt. \quad (9)$$

Na rysunku 3 przedstawiono schemat oddziaływania użytkownika na parametry techniczne $u(t)$ kotła CO przy pomocy dodatkowych urządzeń technicznych, tj. pompy i wentylatora.

Sterowanie kotłem odbywa się dzięki informacjom, jakie można uzyskać samodzielnie bez udziału urządzeń elektronicznych, wykorzystując jedynie wskazania

urządzeń rejestrujących zmiany temperatury. W układzie sterowania (rys. 3) istnieją opóźnienia reakcji w następującym łańcuchu działania — odczyt temperatury — człowiek (odbiór informacji, zapamiętanie, przetworzenie, działanie) — reakcja pompy lub wentylatora na zadaną wielkość wejściową [3, 5, 6, 10].

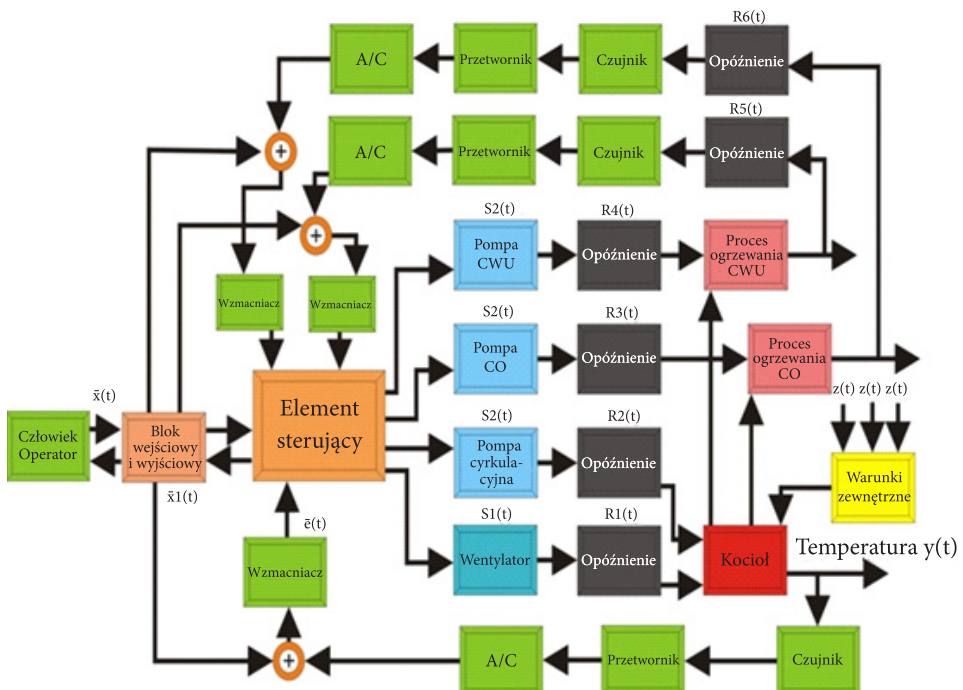


Rys. 3. System antropotechniczny sterowania eksploatacją kotła CO — użytkownik w pętli sprzężenia zwrotnego

Wraz z rozwojem technologii produkcji i sterowania wprowadzono urządzenia elektroniczne i elektryczne, które umożliwiają dokładne sterowanie parametrami technicznymi kotła CO. Dzięki temu znacząco wzrosły możliwości sterowania kotła, nie tylko ograniczając się do pomiaru większej ilości zmiennych, lecz także do zdalnego sterowania kotłem w sposób przewodowy (moduł sterowania temperaturą w pomieszczeniach użytkowych) lub bezprzewodowy (internet, Wi-Fi, GSM). Wykorzystanie nowoczesnej techniki sterowania kotła, np. czujników pogodowych, zaimplementowanych programów optymalizacyjnych sterowania w wykonawczych mikroprocesorach systemu ogrzewania, powoduje, że sam proces regulacji sprowadza się do jednej czynności — informacji o temperaturze, która powinna być utrzymywana w danym pomieszczeniu. Sterownik (mikrokomputer) samodzielnie będzie zarządzał osprzętem technicznym kotła CO w celu utrzymania zadanej wielkości wejściowej. Przedstawione powyżej elementy oraz ich charakterystyki występują we wszystkich układach regulacji systemu sterowania kotłem CO. Razem stanowią złożony układ regulacji, który jako całość posiada określoną dynamikę wyznaczoną przez parametry eksploatacyjne kotła. Uzyskanie opisu dynamiki całego układu regulacji pozwala na ocenę jego pracy jako całości w systemie sterowania kotła CO.

Analizując nowoczesne rozwiązania związane z rozbudową systemów grzewczych, system sterowania rozbudowano o obsługę dodatkowych pomp i czujników. Wraz z ogrzewaniem pomieszczeń, użytkownicy ogrzewają też wodę użytkową.

Sterownik taki musi obsługiwać trzy pompy oraz wentylator. Wszystkie procesy ogrzewania powinny być też monitorowane (rys. 4). Kotły automatyczne ze względu na większe bezpieczeństwo dają możliwość sterowania zdalnego, nie tylko za pomocą sterownika temperatury, który znajduje się w pomieszczeniu, lecz także za pomocą telefonu komórkowego — np. SMS. W zależności od tego, czy jest to układ otwarty, czy zamknięty, instalacja powinna być wyposażona w naczynie przeponowe lub naczynie otwarte, zawór bezpieczeństwa, ewentualnie w węzłownice. Dopiero w takim przypadku możemy stwierdzić, że wystarczające stają się zabezpieczenia realizowane przez sterownik i czujnik temperatury.



Rys. 4. Schemat modelu systemu eksploatacji kotła z obsługą trzech pomp

3. Pomiary wybranych charakterystyk sterowania kotłów

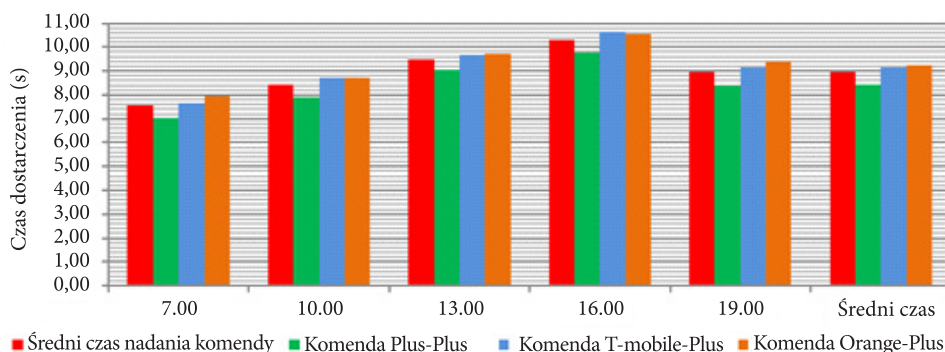
Badania kotłów CO miały na celu określenie podstawowych charakterystyk eksploatacyjnych ze zdalnym, bezprzewodowym sterowaniem wykorzystującym ogólnodostępną sieć transmisji sygnałów GSM przedstawioną na rysunku 5a. Czas reakcji kotła, tj. opóźnienie komunikatu pomiędzy modulem sterowania a reakcją urządzeń elektrycznych, jest funkcją sposobu oddziaływania na zadaną temperaturę (rys. 5b). W przypadku komunikatu otrzymywanego ze sterownika pogodowego

wynosił 2 [s], natomiast wymuszenie, komenda nadawana przez moduł GSM to opóźnienie -4 [s].



Rys. 5. a) Sposoby komunikacji bezprzewodowej w eksploatowanym systemie grzewczym;
b) czas przesyłu komunikatu pomiędzy modulem sterowania a kotłem CO

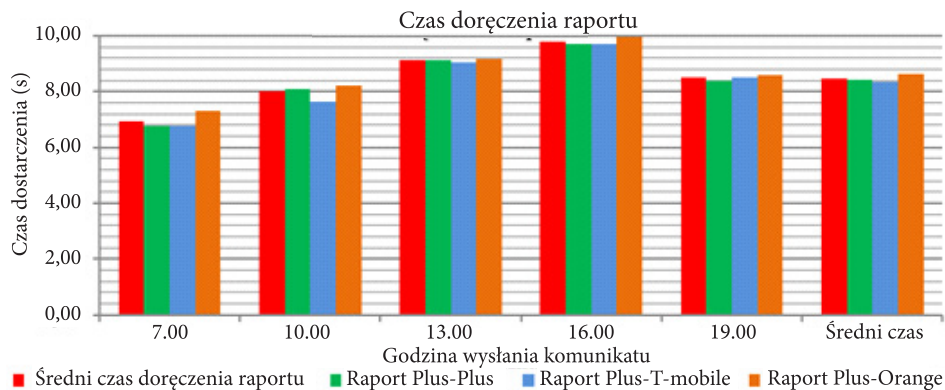
Na rysunku 6 przedstawiono zależność czasu pomiędzy wysłaniem komendy z terminala mobilnego a odbiorem tego sygnału przez moduł sterujący pieca. Minimalny czas opóźnienia, który został zarejestrowany podczas prowadzonych badań, występował w tej samej sieci bezprzewodowej (*Plus*) i wynosił 7,05 [s]. Przypadek ten został zarejestrowany o godzinie 7.00, a było to spowodowane najmniejszym obciążeniem w sieci bezprzewodowej. Największe opóźnienie czasowe występuje w przypadku połączenia między siecią *T-mobile* a *Plus* o godzinie 16.00. Podczas wykonywania badań największe opóźnienie uzyskano w przypadku połączenia w sieci *Orange-Plus*. Średni czas opóźnienia połączeń to 9,26 [s].



Rys. 6. Czas opóźnienia pomiędzy wysłaniem komendy z terminala mobilnego a odbiorem przez moduł sterujący pieca CO

Podczas przeprowadzania badań dało się zauważyć zwiększanie czasu połączenia wraz z coraz późniejszą godziną nawiązywania połączenia, godz. 13.00-19.00. W tym czasie w sieci telekomunikacyjnej występuje tzw. „szczyt” połączeń — tj. maksymalne obciążenie sieci [2, 9]. Zwiększenie ruchu telekomunikacyjnego pomiędzy godziną 7.00-19.00 wydłużyło czas przesyłania komendy o 3 [s] — to jest o około 40%. Takie

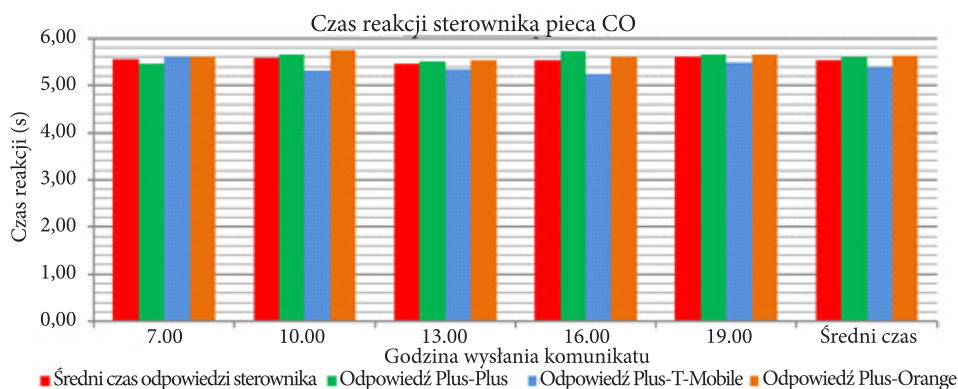
zwiększenie czasu opóźnienia świadczy o tym, że sieci telekomunikacyjne mają określoną przepustowość (rys. 7).



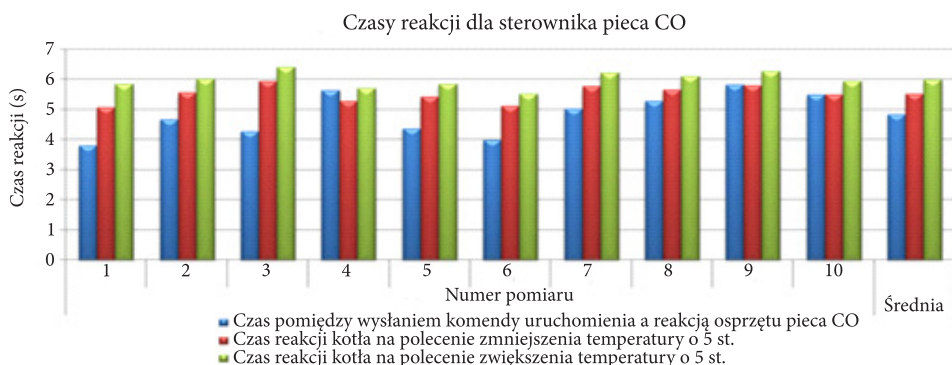
Rys. 7. Czas doręczenia raportu do urządzenia sterowania kotła CO

Czas doręczenia raportu został wyznaczony jako różnica czasu doręczenia i momentu wysłania komendy. Czas dostarczenia raportu jest znacznie krótszy niż czas w przypadku wysłania komendy. Różnica ta wyniosła około jednej sekundy o każdej porze dnia. Jest to spowodowane tym, że wiadomość z komendą musi zawierać dane uwierzytelniające w postaci loginu i hasła, co wydłuża znacznie czas komunikacji pomiędzy urządzeniem mobilnym a odbiornikiem. Przy analizie czasów opóźnienia warto zwrócić uwagę, że w przypadku dostarczania raportów nie ma tak dużych różnic czasowych jak przy przesyłaniu komend [4, 7, 8]. Wysyłanie komunikatów z użyciem sieci Plus było znacznie szybsze, jednak przy dostarczaniu raportów różnica ta się zmniejszyła do wartości czasu około 0,4 [s]. Czas ten można zakwalifikować jako błąd pomiarowy, gdyż tyle wynosi średnio czas reakcji człowieka na wymuszenie, które pojawia się na ekranie urządzenia mobilnego. Przy dostarczaniu raportów oraz przesyłaniu komend można zauważyć działanie telekomunikacyjnego szczytu w danej sieci telefonii. W czasie prowadzonych badań miało to miejsce o godzinie 16.00. Powoduje to zwiększenie czasu dostarczenia o około 3 [s], co w tym wypadku stanowi aż 50% ogólnego czasu dostarczania raportu. Średni czas dostarczenia raportu wynosi około 8,4 [s] — czyli dokładnie tyle ile wynosi czas dostarczenia komunikatu podczas badań o godz. 10.00 i 19.00. Wyniki pomiarów czasu pomiędzy wysłaniem komendy z terminalu mobilnego (telefonu) a odpowiedzią sterownika pieca CO zostały przedstawione na rysunku 8.

Przeprowadzone pomiary czasu transmisji sygnału sterowania wykazały, że czas komunikacji pomiędzy sterownikiem temperatury, który zainstalowany jest w pomieszczeniu użytkowym, a zainstalowanym na kotle urządzeniem odbiorczym wynosi około 3,3 [s]. W przypadku sterowania bezprzewodowego z wykorzystaniem sieci GSM czas ten wyniósł 8,3 [s] (rys. 9).



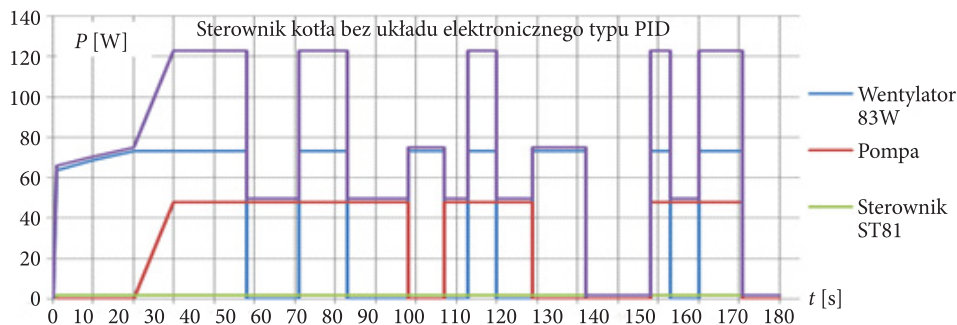
Rys. 8. Czas pomiędzy wysłaniem komendy z terminalu mobilnego (telefonu) a odpowiedzią sterownika pieca CO



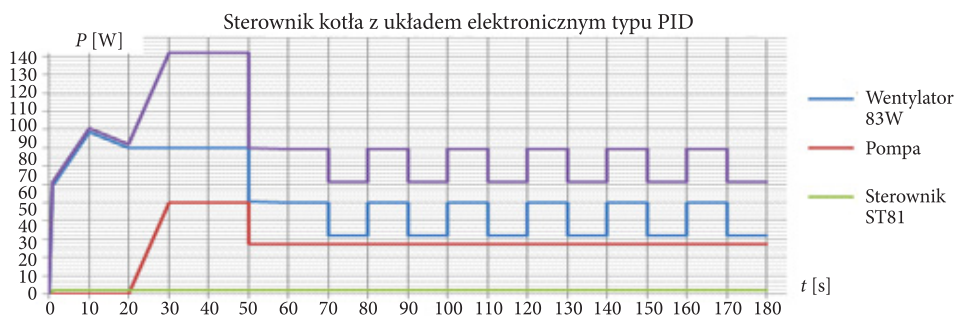
Rys. 9. Czasy reakcji kotła — sterownik temperatury w pomieszczeniu użytkowym

Przy wymuszeniu temperatury przez sterownik, który zainstalowany jest w pomieszczeniu użytkowym, czas reakcji wyniósł 3,33 [s] — uruchomienie silnika elektrycznego. Jeśli takie samo wymuszenie temperatury zostanie wysłane przy pomocy telefonu komórkowego, to czas, który upłynie od momentu otrzymania do uruchomienia silnika, wynosi 5,33 [s]. Związane jest to z tym, że sterownik temperatury pokojowy pracuje jak równoległe urządzenie do sterownika. W tym przypadku komunikacji nie istnieje potrzeba odkodowania wiadomości, jak to ma miejsce w przypadku modułu GSM [7, 8, 9]. Na podstawie przedstawionych wykresów czasów reakcji (rys. 7-9) można zauważyć, że zarówno w przypadku modułu GSM, jak i sterownika temperatury reakcja urządzeń jest szybsza. Jest to spowodowane tym, że podczas uruchamiania kotła w pierwszej kolejności musi zostać uruchomiona grzałka w palniku. Na rysunku 10 przedstawiono pobór mocy elektrycznej z sieci elektroenergetycznej kotła ze sterownikiem bez układu elektronicznego typu PID. Maksymalny pobór mocy przez wszystkie urządzenia wynosi 124 [W]. Ze względu

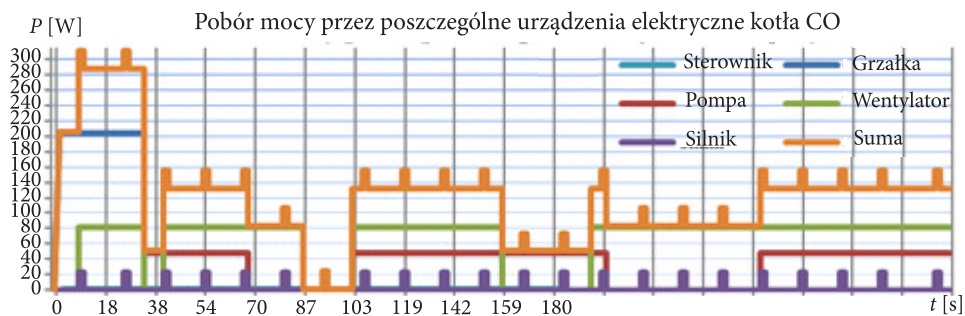
na impulsową pracę urządzeń elektrycznych — wykonawczych kotła — w czasie ich pracy występuje max. pobór mocy w czasie (30-48) [s], (62-75) [s]. Na rysunku 11 przedstawiono pobór mocy elektrycznej z sieci elektroenergetycznej kotła ze sterownikiem i układem elektronicznym typu PID [1, 9, 10].



Rys. 10. Pobór mocy kotła ze sterownikiem bez układu elektronicznego z trzema członami: proporcjonalnym, całkującym i różniczkującym — typu PID



Rys. 11. Pobór mocy kotła ze sterownikiem typu PID



Rys. 12. Pobór mocy przez poszczególne urządzenia elektryczne kotła

Na rysunku 12 przedstawiono pobór mocy przez poszczególne urządzenia elektryczne kotła wykorzystywane podczas procesu eksploatacji. Wypadkowy przebieg poboru mocy z sieci energetycznej jest impulsowy. Wartość średnia poboru mocy uzależniona jest od czasu włączenia lub wyłączenia danego urządzenia elektrycznego. Po włączeniu grzałki elektrycznej, w czasie od 2 do 32 [s], występuje maksymalny pobór mocy rzędu 290 [W]. W następnych etapach pracy kotła wartość średnia poboru mocy kształtuje się na poziomie 132 [W].

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań procesu eksploatacji urządzenia grzewczego — kotła CO. Przeprowadzono analizę czasów propagacji sygnałów sterujących zewnętrznych i wewnętrznych z bilansem zużycia energii elektrycznej pobieranej przez urządzenia kotła. W wyniku badań czasów przesyłania komunikatów w systemie eksploatacji można stwierdzić wpływ następujących parametrów eksploatacyjnych na proces użytkowania kotła:

- miejsce instalacji kotła — pomieszczenie, ukształtowanie terenu, zabudowa, odległość od stacji nadawczo-odbiorczej systemu GSM [6, 9];
- czas nawiązywania łączności (w godzinach porannych czas przesyłania wiadomości jest zdecydowanie krótszy niż w godzinach popołudniowych);
- operator i typ sieci telekomunikacyjnej (zdecydowanie krótsze czasy w przypadku przesyłania komunikatów w ramach jednej sieci);
- rodzaj komunikacji pomiędzy osprzętem elektronicznym kotła CO (czas reakcji na zmiany wprowadzone przez sterownik pokojowy jest krótszy niż w przypadku modułu GSM).

Artykuł wpłynął do redakcji 21.12.2016 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 18.01.2017 r.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XXX Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Ekomilitaris 2016”, Zakopane, 13-16.09.2016 r.

Praca finansowana z Projektu Badawczego Statutowego nr 928/2016.

LITERATURA

- [1] PAŚ J., *Analiza niezawodnościowa systemu zasilania energią elektryczną mobilnych systemów biometrycznych*, Prace Naukowe Transport, z. 100, Politechnika Warszawska, 2014.
- [2] PAŚ J., *Operation of electronic transportation systems*, Publishing House University of Technology and Humanities in Radom, Radom, 2015.
- [3] STANISZEWSKI R., *Sterowanie procesem eksploatacji*, WNT, Warszawa, 1988.
- [4] DYDUCH J., PAŚ J., ROSIŃSKI A., *Podstawy eksploatacji transportowych systemów elektronicznych*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2011.

- [5] STANISZEWSKI R., *Cybernetyczna teoria projektowania*, Ossolineum, Wrocław, 1986.
- [6] LEWITOWICZ J., KUSTROŃ K., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, t. 1-6, ITWL, Warszawa, 2003.
- [7] SIERGIEJCZYK M., PAŚ J., ROSIŃSKI A., *Issue of reliability–exploitation evaluation of electronic transport systems used in the railway environment with consideration of electromagnetic interference*, IET Intelligent Transport Systems, 2016.
- [8] PAŚ J., SIERGIEJCZYK M., *Interference impact on the electronic safety system with a parallel structure*, Diagnostyka, 2016.
- [9] PAŚ J., *Analysis of exploitation access control system selected object*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 91, nr 10, 2015.
- [10] ŻÓŁTOWSKI B., NIZIŃSKI S., *Modelowanie procesów eksploatacji maszyn*, AT-R Bydgoszcz, 2002.
- [11] PASZKOWSKI S., *Podstawy teorii systemów i analizy systemowej*, WAT, 2002.

J. PAŚ

The model of controlling exploitation process of complex technical object

Abstract. The exploitation of complex technical object includes two processes: handling as an activity preparing the technical object to be set up and using as an activity consisting in using it for its intended purpose. Analysis of the exploitation process of the heater (heating boiler), is the search for answers to two questions — how to use a device to achieve the best effect and what using procedures should be used to restore the required exploitation potential.

Keywords: exploitation, complex technical object, handling

DOI: 10.5604/01.3001.0009.9489