

dr inż. Andrzej Zbrowski
dr inż. Tomasz Samborski

Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy
ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Polska

E-mail: andrzej.zbrowski@itee.radom.pl tomasz.samborski@itee.radom.pl

Badania napędów elektromechanicznych stosowanych w systemach oddymiania i wentylacji

Słowa kluczowe: *system badań, napęd elektromechaniczny, oddymianie, wentylacja, system ppoż.*

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania eksperymentalne napędów elektromechanicznych pod kątem zastosowania w systemach wentylacji i oddymiania budynków. Wyznaczone charakterystyki (siła, przemieszczenie, prąd i napięcie zasilania w funkcji czasu) pozwalają na dokonanie oceny możliwości ich zastosowania do napędu klap i okien w systemach przeciwpożarowych. W badaniach wykorzystano opracowane stanowisko umożliwiające wyznaczenie charakterystyk pracy napędów liniowych i obrotowych w zmiennych warunkach temperatury.

1. Wstęp

Siłowniki elektromechaniczne znajdują coraz szersze wykorzystanie w aplikacjach przemysłowych, w których występuje konieczność niezawodnego wywierania wielokrotnych obciążeń siłowych. Zadaniem rozwiązań elektromechanicznych jest konwersja energii elektrycznej na energię mechaniczną układu wykonawczego.

Dynamiczny rozwój siłowników napędzanych energią elektryczną jest spowodowany coraz większym upowszechnieniem tych rozwiązań w najbardziej wymagających gałęziach nowoczesnej techniki. Ze względu na odpowiedzialność i krytyczność realizowanych funkcji w układach wykonawczych stosowanych w aplikacjach związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa technicznego obiektów lub bezpieczeństwa ludzi, wykorzystywane aktuatory elektromechaniczne muszą spełniać najwyższe wymagania dotyczące trwałości i niezawodności. W tym celu konieczne jest prowadzenie szczegółowych badań umożliwiających wyznaczenie charakterystyk eksploatacyjnych siłowników w różnych warunkach wymuszeń siłowych i środowiskowych występujących w procesie eksploatacji. Badania laboratoryjne wykonywane w warunkach zbliżonych do rzeczywistych stanowią podstawowy element umożliwiający pozyskiwanie trudno dostępnej wiedzy związanej z prawidłową eksploatacją i trwałością. Rejestrowane podczas badań parametry pracy umożliwiają rozwój nowoczesnych systemów diagnostycznych stanowiących nieodzowny element bezpiecznych systemów sterowania. Informacje pozyskane z badań stanowią cenne zbiory danych wykorzystywanych w modelach diagnostyki i prognozowania zdolności eksploatacyjnej. Doskonalenie metod badawczych, wiarygodność odtwarzanych warunków użytkowania oraz precyzja rejestrowanych parametrów eksploatacyjnych siłowników elektromechanicznych należą do podstawowych warunków zapewniających wysoki poziom bezpieczeństwa technicznego.

2. Zastosowanie siłowników elektromechanicznych

Aktuatory elektromechaniczne dynamicznie wkraczają do nowych obszarów zastosowań w przemyśle lotniczym (cywilnym i wojskowym), kosmicznym i morskim. W konstrukcji płatowców głównym zadaniem siłowników z napędem elektrycznym jest pozycjonowanie elementów usterzenia w postaci lotek, klap, spojlerów, hamulców aerodynamicznych. W przypadku statków kosmicznych siłowniki z napędem elektrycznym zapewniają pozycjonowanie anten i zrobotyzowanych ramion manipulatorów. Planowane jest także zastosowanie siłowników z napędem elektrycznym w konstrukcji ракет i wyrzutni do sterowania wektorem ciągu [25]. Prowadzone są także prace rozwojowe, których celem jest wykorzystanie rozwiązań elektromechanicznych do pozycjonowania elementów usterzenia okrętów i łodzi podwodnych [20, 38].

W najnowszych maszynach latających układy elektromechaniczne są odpowiedzialne za sterowanie podwoziem (Boeing 787 lub Airbus 380) oraz pozycjonowanie elementów uzbrojenia (F-35 Joint Strike Fighter) [1]. W najbliższych latach przewidywana jest intensyfikacja prac badawczych ukierunkowanych na budowę statków powietrznych wykorzystujących tylko systemy elektryczne z całkowitą eliminacją układów hydraulicznych [2]. Eliminacja centralnego układu hydraulicznego zmniejszy masę samolotu oraz obniży poziom konsumpcji energii niezbędnej do napędu układów wykonawczych.

Siłowniki elektromechaniczne są jednak rozwiązaniami znacznie bardziej skomplikowanymi niż hydrauliczne. Wiąże się to z koniecznością integracji w ramach jednego modułu wielu precyzyjnych komponentów, do których należą silniki elektryczne (najczęściej dwa), sumujące przekładnie różnicowe, przekładnie redukcyjne, mechanizmy śrubowe oraz wbudowane elementy systemu sterowania [25]. Pomimo wysokiego stopnia złożoności, układy te muszą spełniać niezwykle restrykcyjne lotnicze wymagania, dla których uszkodzenie nie może wystąpić częściej niż 1×10^5 godzin lotu (samolot myśliwisko-szturmowy F/A 18) lub nawet 18×10^6 (myśliwiec F-35 AB) [6].

Z punktu widzenia bezpieczeństwa aktuatory należą do krytycznych komponentów systemu statku powietrznego (rys. 1).



Rys. 1. Aktuatory z przekładnią śrubowo toczną sterujące położeniem klap w samolocie transportowym IŁ-76

Nawet drobna, nie wykryta usterka może prowadzić do bardzo poważnych konsekwencji. Potwierdzają to wyniki badań wypadków lotniczych, w których przyczyną katastrofy okazały się np. awarie aktuatora steru kierunku poziomego. Zarejestrowano także przypadki, w których nadmierne, niekontrolowane zużycie serwowatorów było przyczyną uziemienia całej floty powietrznej. Dlatego siłowniki stosowane w lotnictwie podlegają szczegółowym badaniom funkcjonalnym. Uzyskane wyniki umożliwiają rozwój niezawodnych konstrukcji i wspomagają lepsze zrozumienie różnorodnych przyczyn wad i defektów złożonych struktur siłowników elektromechanicznych.

Gromadzenie wiedzy wynikającej z przeprowadzonych eksperymentów umożliwia szybką i pewną detekcję oraz rozpoznawanie usterek. W tym celu dodatkowo wykorzystywane są metody FMEA i FTA wspomagające budowę odpowiednich algorytmów dopasowanych do konkretnego rozwiązania siłownika [14]. Opracowane metody predykcji usterek siłowników stanowią podstawowy element współczesnych systemów monitorowania wykorzystujących sztuczną inteligencję, logikę rozmytą i sieci neuronowe. Analiza możliwych uszkodzeń pozwala na dobór algorytmów detekcji – metod heurystycznych, metod bazujących na modelach oraz zbiorach danych eksperymentalnych [13, 17]. Zapewniają one wczesne wykrywanie uszkodzeń o małych rozmiarach, a także śledzenie stopniowych degradacji.

Opracowywane systemy diagnostyczne siłowników elektromechanicznych wspomagają prawidłowe planowanie prac remontowych. Tradycyjne podejście polegające na wykonywaniu przeglądu po upływie wyznaczonego resursu godzinowego jest rozwiązaniem niesatysfakcjonującym. Obserwowane zużycie, szczególnie w przypadku samolotów wojskowych, jest uzależnione od indywidualnego stylu pilotażu i środowiska eksploatacji. Przyczyny zaistniałych, niebezpiecznych zdarzeń tkwią w zużyciu zachodzącym szybciej niż zakładane ze względu na specyficzny styl pilotażu wynikający z warunków pola walki [17]. Dlatego racjonalną drogą postępowania jest zastąpienie okresowych przeglądów i remontów przez strategię przeprowadzania remontów na podstawie bieżącej oceny stanu technicznego obiektu, dokonanej z zastosowaniem inteligentnego systemu prognozowania dalszej zdolności eksploatacyjnej. Systemy diagnostyki siłowników umożliwią eliminację układów redundantnych, charakterystycznych dla struktur lotniczych, co przyczyni się do znacznej redukcji masy i ograniczenia wymiarów gabarytowych w nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych płatowców, a także innych odpowiedzialnych układów systemów bezpieczeństwa technicznego [13].

Ze względu na odpowiedzialność realizowanych zadań, precyzyjnie archiwizowany zbiór wieloletnich doświadczeń oraz wysoki potencjał wdrożeniowy, badania siłowników stosowanych w przemyśle lotniczym wyznaczają standardy testów tych urządzeń także w innych dziedzinach dotyczących przemysłu maszynowego, okrętowego i budownictwa.

3. Badania siłowników

Badania siłowników elektromechanicznych umożliwiają rozwój bezpiecznych systemów z tolerancją uszkodzeń, autodiagnostyką, wczesnym wykrywaniem i lokalizacją defektu oraz oceną stopnia degradacji urządzeń i elementów wykonawczych. Rozwój zaawansowanych badań siłowników elektromechanicznych jest stymulowany głównie potrzebami przemysłu lotniczego. W tym celu prowadzone są intensywne badania eksploatacyjne oraz laboratoryjne badania stanowiskowe. Wyniki badań są podstawową informacją wykorzystywaną w opracowywanych systemach diagnostyki i monitoringu.

Pierwsze prace eksperymentalne prowadzono na obiektach rzeczywistych, w których siłowniki hydrauliczne zastąpiono badanym układem elektromechanicznym. Takie badania wykonano w ramach programu Electrically Powered Actuation Design (EPAD) zrealizowanego w ramach współpracy US Air Force, US Navy i NASA. W ramach badań w myśliwcu F/A-18B zainstalowano siłownik elektromechaniczny do sterowania lotką lewego skrzydła. Badania prowadzone w czasie 22 lotów, trwających ogółem 25 godzin, umożliwiły rejestrację parametrów pracy siłownika i porównanie z działaniem klasycznego układu hydraulicznego znajdującego się w prawym skrzydle [12]. Podstawowe problemy wykryte podczas testów dotyczyły przegrzewania się konstrukcji silnika, nieefektywnego rozpraszania energii podczas hamowania układu i niskiej trwałości zabudowy nakrętki tocznej.

W celu prowadzenia tańszych badań laboratoryjnych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, opracowano przenośne stanowisko badawcze, umożliwiające prowadzenie badań w locie, na pokładzie statku powietrznego. Stanowisko opracowano we współpracy NASA Prognostic Center of Excellence oraz California Polytechnic State University [3, 16, 27]. Instalacja stanowiska nie wymaga przeróbek w konstrukcji płatowca. Eksploatacja na pokładzie statku umożliwia prowadzenie badań w warunkach oddziaływania rzeczywistych obciążeń wynikających z różnorodnych wartości wektorów prędkości i przyspieszeń występujących w czasie lotu. Stanowisko składa się z trzech siłowników: dwóch badanych oraz jednego wywołującego obciążenie. Jeden z badanych siłowników jest sprawny, w drugim natomiast celowo wywołane jest zdefiniowane uszkodzenie. Badane siłowniki są na zmianę, za pomocą sprzęgieł magnetycznych, przyłączane do układu obciążającego. Rodzaje wywoływanych uszkodzeń dotyczą usterek mechanizmu śrubowego (ubytek bieżni śruby, deformacja kulek, zacięcie w kanale powrotnym nakrętki, nadmierny luz skojarzenia ruchowego), silnika elektrycznego (przegrzewanie, drgania), czujników (błąd wskazań lub utrata sygnału) [5]. Układ sensoryczny stanowiska umożliwia rejestrację amplitudy i częstotliwości drgań badanego siłownika, wartości oddziaływującego obciążenia, temperatury, napięcia i natężenia pobieranego prądu elektrycznego oraz długości i pozycji kątowej śruby. Przebiegi charakterystyk są skorelowane w czasie z informacjami rejestrowanymi przez pokładowy system rejestracji parametrów lotu.

Badania pozwalają na rejestrację charakterystyk monitorowanych parametrów podczas występowania wytypowanych uszkodzeń i porównywanie ich ze wzorcem pochodzącym ze sprawnego siłownika. System badawczy jest przystosowany do współpracy z wojskowym samolotem transportowym Boeing C-17 Globemaster oraz śmigłowcem UH60 Blackhawk. Stanowisko umożliwia także testowanie systemów diagnostycznych monitorujących pracę badanych siłowników. Rozwiązanie znalazło szerokie zastosowanie jako platforma badawcza umożliwiająca testowanie systemów diagnostyki i sterowania funkcjonujących w warunkach występujących uszkodzeń. Z wykorzystaniem stanowiska przeprowadzono liczne testy i badania weryfikacyjne systemów diagnostyki i predykcji opartych na modelach, danych eksperymentalnych, oraz rozwiązaniach hybrydowych łączących modele analityczne z funkcjami wyznaczonymi doświadczalnie [4,15, 25].

Alternatywę przenośnych systemów badawczo-testowych stanowią stanowiska stacjonarne, umożliwiające prowadzenie badań siłowników o większych gabarytach i obciążalności. Prezentowane w pracy [1] badania siłownika Moog MaxForce 833-023 przeprowadzono z zastosowaniem systemu wykorzystującego rozwiązanie z układem hydraulicznym. Badany siłownik połączono z hydraulicznym siłownikiem obciążającym za pomocą ramienia obrotowego. Stanowisko umożliwia trzykierunkowy pomiar przyspieszeń oddziaływujących na aktuator, rejestrację temperatury stojana, określanie pozycji końca tłoczyska oraz dwukierunkowy pomiar siły na tłoczysku. System sterowania umożliwia zadawanie zróżnicowanych poziomów, typów i profili obciążenia testowanego siłownika.

Inne stacjonarne stanowisko zbudowane we współpracy Impact Technologies i NASA Ames Research Center jest wykorzystywane do eksperymentalnych badań metod diagnostyki i prognozowania siłowników elektromechanicznych z przekładnią śrubowo-toczną [1]. Obciążenia dynamiczne są zadawane z zastosowaniem dużego siłownika elektromechanicznego Mogg 866 umożliwiającego generowanie siły wzdłużnej do wartości 50 000 N. System sterowania zapewnia możliwość różnorodnego kształtowania profilu obciążenia. Obciążenie może być zadawane według przebiegu prostokątnego, trapezowego, sinusoidalnego i trójkątnego. Struktura stanowiska umożliwia realizację prób długotrwałych z rejestracją danych pomiarowych z częstotliwością do 64 kHz.

Uproszczoną wersją stanowiska jest rozwiązanie wykorzystujące siłownik pneumatyczny w celu wywierania obciążenia na tłoczysko badanego siłownika elektromechanicznego [1]. Za

pomocą zastosowanego układu pneumatycznego możliwe jest wywieranie obciążeń nie przekraczających wartości 4500 N. System wyposażono w trzy niezależne kontrolery. Dwa pracujące w układzie podporządkowanym, nadzorują działanie proporcjonalnego regulatora ciśnienia powietrza oraz serwosilnika i współpracują z nadrzędnym sterownikiem PXI.

Nieco odmienną koncepcję badań siłowników elektromechanicznych zastosowano w metodzie wykorzystującej czujniki Halla do diagnostyki stanu technicznego przekładni śrubowo-tocznych. Bezstykowa technika pomiaru umożliwia monitoring zużycia aktuatora na podstawie wykrytych uszkodzeń kulek stanowiących elementy toczne mechanizmu śrubowego [9]. Czujnik Halla zainstalowany na nakrętce umożliwia generowanie sygnału sinusoidalnego, proporcjonalnego do odległości zarysu kulki od powierzchni czujnika. W przypadku detekcji uszkodzonej kulki zarys sygnału jest zniekształcony i posiada mniejszą amplitudę. Badania przeprowadzono na stanowisku, w którym napęd przekładni stanowił silnik elektryczny o mocy 30 kW. Obciążenie osiowe badanego mechanizmu zadawano z zastosowaniem siłownika hydraulicznego połączonego z czołem śruby. Poziom obciążenia zależnego od ciśnienia w siłowniku reguluje sterownik zaworu proporcjonalnego.

Badania siłowników elektromechanicznych wykorzystujących silniki krokowe umożliwia stanowisko opracowane w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej. Jego przeznaczeniem jest wyznaczanie charakterystyk eksploatacyjnych precyzyjnych siłowników liniowych o wysokiej rozdzielczości i dokładności pozycjonowania [43]. Wyznaczanie granicznych charakterystyk ruchowych realizowane jest za pomocą impulsów zasilających o znanej częstotliwości, obciążania popychacza siłą o znanej wartości, a także precyzyjnej detekcji ruchu popychacza. Stanowisko jest wyposażone w dwa tory zadawania wymuszeń: tor sterowania i tor obciążania siłownika oraz dwa tory pomiarowe: siły obciążającej i przemieszczenia popychacza. Badany siłownik jest obciążany za pomocą silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną, sprzęgniętego z popychaczem mechanizmem rolkowo-ciężnowym z zabudowanym tensometrycznym czujnikiem siły. Graniczne charakterystyki rozruchowe wyznaczone są poprzez programowe obciążanie siłownika określoną siłą i poszukiwanie maksymalnej częstotliwości taktowania, przy której siłownik ruszy i będzie stabilnie pracował. Miarą stabilnej pracy jest wykonanie przez popychacz siłownika przemieszczenia liniowego wynikającego z zadanej liczby impulsów taktujących.

Oprócz prac badawczych realizowanych w ośrodkach naukowych, badania aktuatorów elektromechanicznych prowadzone są przez laboratoria firm produkcyjnych. W tych przypadkach wyniki testów są danymi poufnymi i nie stanowią materiału dostępnego w formie publikacji. Przykładem efektów takiej aktywności jest stanowisko firmy Honeywell International Inc. umożliwiające prowadzenie badań liniowych aktuatorów elektromechanicznych stosowanych w wielu gałęziach przemysłu (lotnictwo, transport, sterowanie procesami) [28]. Badania testowe realizowane są w warunkach dynamicznych obciążeń odzwierciedlających charakter pracy aktuatora wynikający z przemieszczanych mas lub działających zmiennych sił w celu określenia bezwładności i opóźnienia reakcji siłownika.

Sterowanie procesami technologicznymi związanymi z przesyłem gazów i cieczy (chemia, górnictwo, przemysł rafineryjny) wymaga stosowania zdalnie sterowanych zaworów napędzanych siłownikami obrotowymi. Producenci automatyki przemysłowej obejmującej napędy zaworów procesowych opracowali stacjonarne (PV 1405 firmy AUMA) oraz mobilne (PV 1236 firmy AUMA) urządzenia testowe pozwalające na sprawdzanie parametrów pracy aktuatorów obrotowych w szerokim zakresie obciążeń (do 6 000 Nm) wyposażone w zintegrowany system diagnostyczny.

Stanowiska do testowania aktuatorów obrotowych stosowanych w transporcie szynowym opracowała także firma Kyalsi Engineering Inc.

4. Siłowniki elektromechaniczne w budowlanych instalacjach przeciwpożarowych

Wśród obszarów technicznych szeroko wykorzystujących siłowniki elektromechaniczne wysoką pozycję zajmuje budownictwo i ochrona przeciwpożarowa. Niezawodność siłowników elektromechanicznych ma także bezpośredni związek z bezpieczeństwem przeciwpożarowym obiektów budowlanych, szczególnie użyteczności publicznej.

Skuteczne prowadzenie działań ratowniczych wymaga odcięcia obszarów objętych pożarem oraz usunięcia dymu z ciągów komunikacyjnych przeznaczonych do ewakuacji osób ze stref zagrożenia [24]. Zamykanie grodzi, otwieranie klap dymowych bądź okien wentylacyjnych realizowane jest z wykorzystaniem siłowników elektromechanicznych [21, 22, 32, 42]. Wykorzystywane w aktuatorach mechanizmy śrubowe, łańcuchowe i wrzecionowe umożliwiają skuteczne i szybkie pozycjonowanie efektora (klapy lub okna) w celu odprowadzenia powstałego dymu i gorącego powietrza na zewnątrz płonącego budynku (rys. 2).

Poprawne funkcjonowanie wentylacji pożarowej jest podstawowym warunkiem przeprowadzenia sprawnej ewakuacji budynku [10, 30, 31], zwłaszcza w obiektach wysokościowych, gdzie podjęcie akcji ratowniczej z zewnątrz jest bardzo utrudnione, a dla kondygnacji zlokalizowanych powyżej 50 m jedyną szansą na ratunek jest ewakuacja przez wewnętrzne korytarze i klatki schodowe [11, 13, 18, 19, 37].



Rys. 2. Liniowy siłownik elektromechaniczny z przekładnią śrubową sterujący otwieraniem klapy oddymiającej na dachu budynku

Siłowniki elektromechaniczne stosowane w układach automatyki współczesnych budynków stanowią wyjątkową grupę odbiorników energii elektrycznej funkcjonujących w systemie ochrony przeciwpożarowej. Ich niezawodne funkcjonowanie w czasie pożaru jest niezbędnym elementem skutecznego przeprowadzenia ewakuacji ludzi uwięzionych w płonącym budynku.

W automatycznych systemach sterowania klapami dymowymi, prąd elektryczny po doprowadzeniu do każdego obiektu rozproszony jest za pomocą odpowiedniej instalacji dopasowanej do stosowanego standardu napięcia i natężenia prądu zasilającego zainstalowany siłownik. Siłowniki do instalacji oddymiania najczęściej wykorzystują prąd stały z zasilaniem o gwarantowanym napięciu 24V DC [39]. Wiąże się to z koniecznością montażu specjalnych centrali wyposażonych w akumulatory odpowiedzialne za awaryjne podtrzymanie zasilania. Niezawodny i bezpieczny przesył energii z centrali do odbiornika wymaga budowy dodatkowej instalacji elektrycznej [35, 36].

Towarzysząca pożarowi temperatura powoduje zmniejszenie przewodności elektrycznej przewodów, co skutkuje pogorszeniem jakości dostarczanej energii elektrycznej objawiającym się nadmiernym spadkiem napięcia oraz pogorszeniem warunków ochrony przeciwporażeniowej [34, 40]. Napięcie o zbyt małej wartości powoduje spadek momentu silników elektrycznych stosowanych w siłownikach, co w znacznym stopniu może utrudniać skuteczne przeprowadzenie akcji ratowniczej. Właściwa współpraca układu zasilania z układem wykonawczym w postaci siłowników jest możliwa jedynie w przypadku zachowania wymaganego poziomu konsumowanej energii elektrycznej niezależnie od działających obciążeń i warunków termicznych [33] panujących w budynku. Muszą one niezawodnie działać w ekstremalnych warunkach jakie występują w czasie pożaru.

Ponieważ najważniejszym elementem działań ratowniczych jest ewakuacja ludzi z obiektu objętego pożarem, stawiane są formalne wymagania dla konstrukcji budynku oraz dla zainstalowanych w nim urządzeń elektrycznych, w tym siłowników elektromechanicznych, funkcjonujących w czasie pożaru.

Norma EN 12101-2 [26] precyzuje wymagania dotyczące klap dymowych montowanych na dachu oraz klap dymowych montowanych w fasadzie budynku, zwanych potocznie oknami oddymiającymi. Zgodnie z normą okienny system oddymiania (okno + napęd, tzw. NSHEV od angielskiej nazwy Natural Smoke and Heat Exhaust Ventilation) powinien stanowić kompletne rozwiązanie oznakowane znakiem CE, zgodnie z Dyrektywą 93/68/WE.

Ze względu na bezpośredni związek ze skutkami zdarzeń w postaci katastrof i wypadków, ratownictwo techniczne i ochrona przeciwpożarowa zajmują szczególnie istotne miejsce w systemie bezpieczeństwa technicznego. Dlatego wprowadzenie każdego nowego rozwiązania musi być poprzedzone szczegółowymi badaniami zarówno na poziomie prac rozwojowych jak i certyfikacyjnych.

5. Metodyka badań

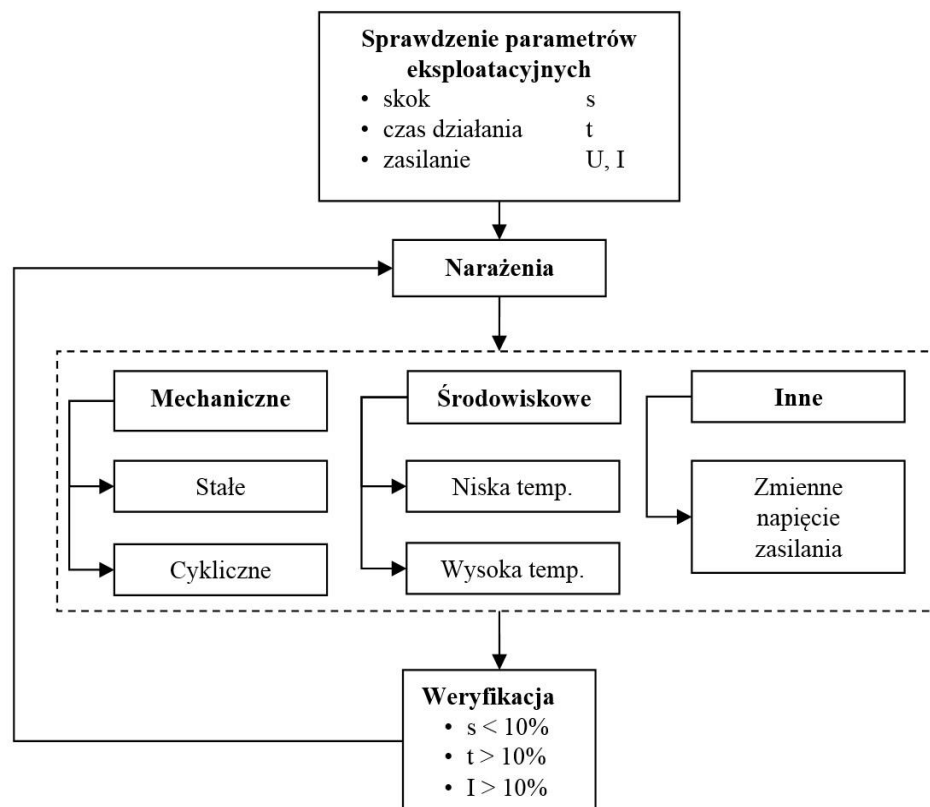
W celu zapewnienia wymaganej niezawodności, związanej z wykonywanymi funkcjami obejmującymi usuwanie toksycznych spalin [8, 28], napędy elektryczne przeznaczone do zastosowania w systemach bezpieczeństwa obowiązkowo poddawane są serii badań [7] umożliwiających nadanie im koniecznych aprobat potwierdzających wymagany poziom oraz stabilność odpowiednich parametrów eksploatacyjnych.

Obszar działalności Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu obejmuje prowadzenie prac badawczych związanych z podniesieniem poziomu bezpieczeństwa obiektów technicznych [23]. Od kilku lat prowadzone są w Instytucie, przy współpracy z Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej – PIB w Józefowie, prace badawczo-rozwojowe związane z opracowywaniem procedur i budową specjalizowanej aparatury badawczej i testowej, wspomagającej systemy bezpiecznej eksploatacji [44], w tym urządzeń ratownictwa technicznego [17] oraz ochrony przeciwpożarowej [29].

W wyniku realizowanych prac dotyczących układów wentylacji pożarowej powstała koncepcja modelowego systemu do badań napędów elektromechanicznych stosowanych w systemach przeciwpożarowych.

Opracowana koncepcja uwzględnia rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie wykazu wyrobów służących zapewnieniu bezpieczeństwa publicznego lub ochrony zdrowia i życia oraz mienia, a także zasad dopuszczenia tych wyrobów do użytkowania. Według wspomnianych przepisów badany obiekt oceniany jest w temperaturze otoczenia. Obciążenie siłowe i rejestracja charakterystyk odbywa się dopiero po naturalnym ostudzeniu lub nagraniu obiektu, uprzednio poddanego narażeniom termicznym.

Opracowana przez autorów metodyka badań, w odróżnieniu od obowiązujących uregulowań prawnych, zakłada rejestrację charakterystyk roboczych on-line w czasie oddziaływania obciążenia termicznego (rys. 3). Jest to rozwiązanie zapewniające weryfikację obiektu badań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacji. Prowadzenie ciągłej rejestracji podstawowych parametrów pracy napędów elektromechanicznych stwarza możliwości prowadzenia rozszerzonej, w stosunku do zdefiniowanej obowiązującymi przepisami, analizy wpływu wymuszeń na zachowanie obiektu badań.



Rys. 3. Schemat wybranych procedur badań napędów elektromechanicznych

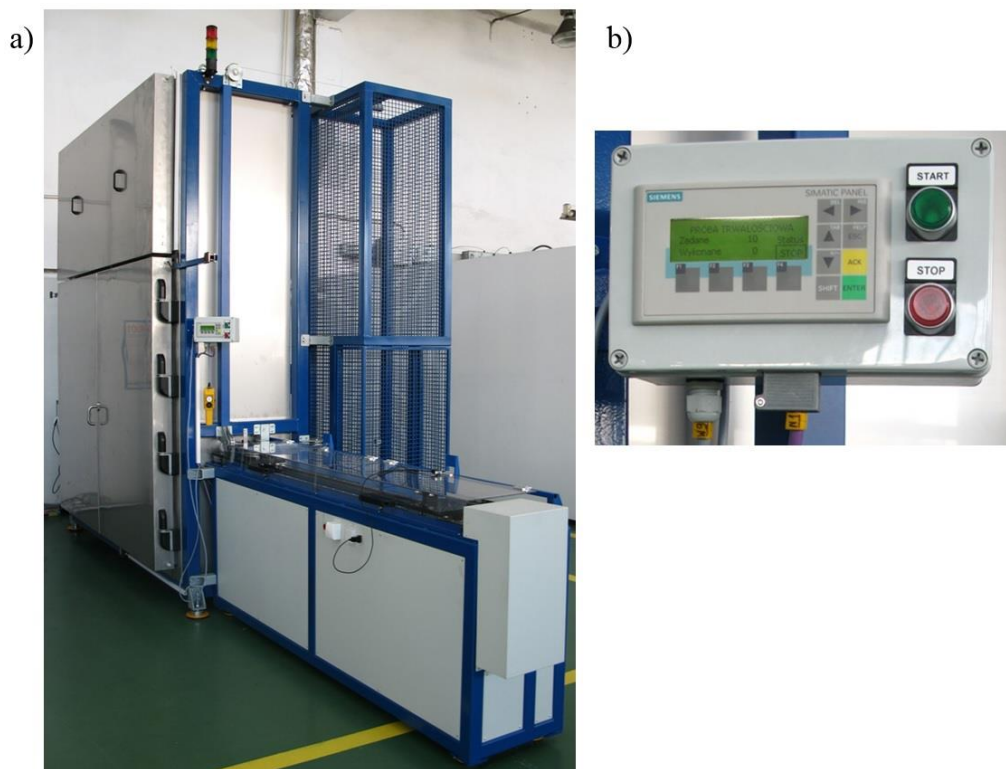
Ocenie podlegają między innymi skok roboczy, pobór prądu zasilania oraz towarzyszący im czas ruchu podczas otwierania i zamykania. Kryteria decydujące o dopuszczeniu napędu do zastosowania w systemach ochrony przeciwpożarowej [7] dotyczą dopuszczalnych zmian trzech parametrów:

- czas ruchu w obydwu kierunkach nie może ulec zmianie więcej niż 10%,
- skok nie zmienił się więcej niż 5 %,
- wzrost poboru prądu nie wyniósł więcej niż +10% dla obydwu kierunków ruchu.

6. Stanowisko badawcze

Podstawowym elementem opracowanego systemu badań napędów stosowanych w technice oddymiania i wentylacji jest stanowisko badawcze. Stanowisko pozwala na prowadzenie w zmiennych warunkach temperaturowych badań napędów, których elementy wykonawcze realizują ruch liniowy lub obrotowy. Opracowane stanowisko umożliwi znaczne rozszerzenie możliwości badawczych w stosunku do istniejących rozwiązań, ze względu na połączenie układów wymuszeń siłowych oraz termicznych, w jednym kompaktowym urządzeniu ze zintegrowanym system sterowania oraz akwizycji danych.

Opracowane i zbudowane w ITeE-PIB urządzenie badawcze (rys. 4) składa się z komory temperaturowej połączonej z układami realizującymi funkcje związane z wymuszeniami mechanicznymi. Podstawowym zespołem urządzenia służącym do zapewnienia stałych warunków środowiskowych (temperatura, wilgotność) towarzyszących badaniu umieszczonego w jej wnętrzu obiektu – siłownika, jest zamocowana na przestrzennej ramie komora termiczna, wyposażona w regulowany, uniwersalny system pozwalający na zamocowanie i obciążanie dowolnego typu siłownika.



Rys. 4. Stanowisko do badania siłowników: a) widok ogólny, b) widok panelu sterowania

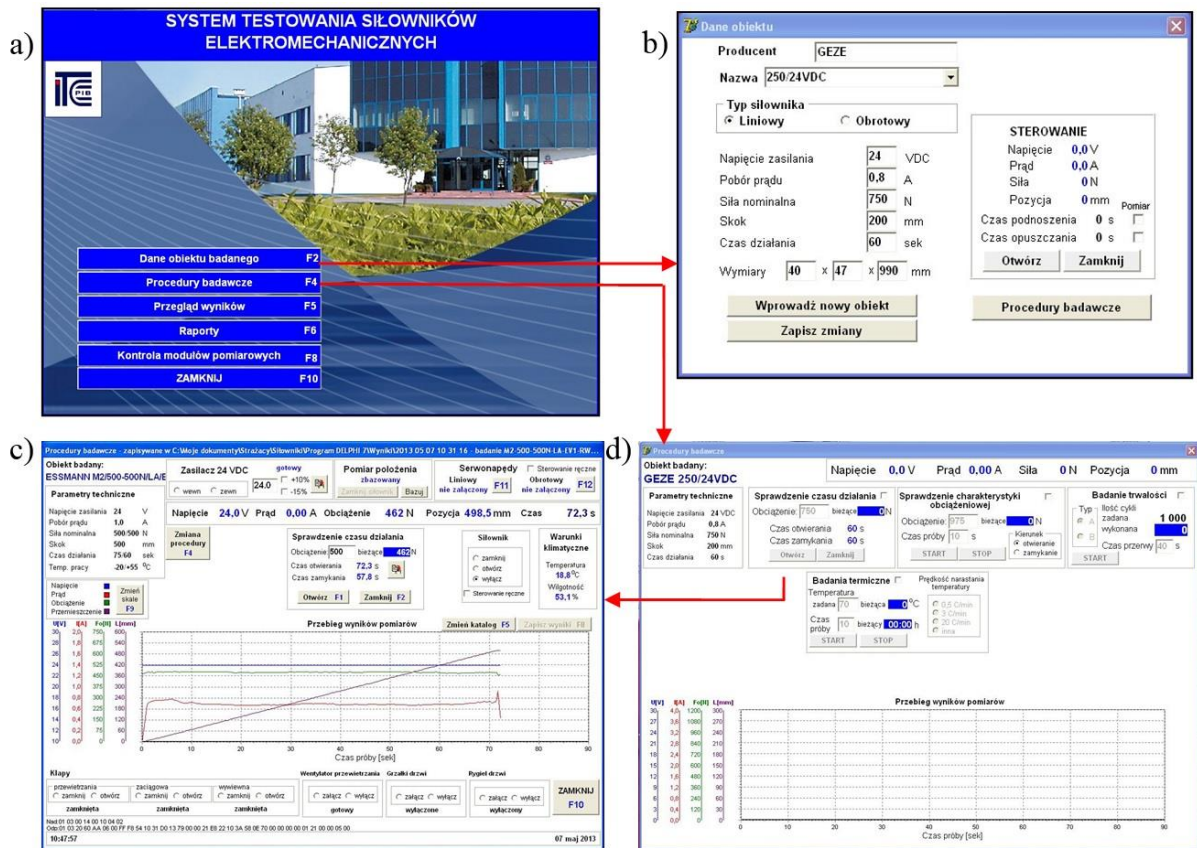
Opracowane rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na obciążanie organów roboczych siłowników liniowych i obrotowych w trakcie ruchu z zastosowaniem grawitacyjnego lub mechatronicznego systemu obciążania. Użycie grawitacyjnego układu obciążającego zapewnia stałość obciążenia podczas prowadzenia badań trwałościowych, gdzie wymagana ilość cykli dochodzi do 10 000. Mechatroniczny system pozwala na realizację badań wytrzymałościowych z zadaną dynamiką.

Podstawowe parametry stanowiska badawczego:

- obciążenie liniowe do 5 kN
- obciążenie momentem obrotowym do 30 Nm
- przemieszczenie w ruchu:
 - liniowym do 1,2 m
 - obrotowym do 4,7 rad
- temperatura badań od 243 do 363 K
- zasilanie siłownika:
 - elektrycznego 24 V, 230 V AC/DC
 - pneumatycznego do 1 MPa

- pomiar i rejestracja: siły lub momentu siły, przemieszczenia, temperatury, wilgotności, napięcia i prądu zasilania.

Kontrolę nad realizacją wybranych procedur badawczych oraz akwizycją danych pomiarowych sprawuje zintegrowany system kontrolno-pomiarowy z oprogramowaniem obejmującym dwa obszary. Pierwszy obszar obejmuje graficzny interfejs użytkownika (rys. 5) komunikującego się z systemem badawczym, z wykorzystaniem komputera PC z systemem Windows, pozwalający na identyfikację obiektu badań, wybór procedury oraz zadawanie parametrów badań. Drugi obszar dotyczy realizacji wybranych przez użytkownika procedur badawczych nadzorowanych bezpośrednio przez sterownik PLC.



Rys. 5. Widok okien oprogramowania sterującego pracą stanowiska: a) główne, b) identyfikacji obiektu, c) pomiarów, d) wyboru procedur

Podstawowym przeznaczeniem stanowiska jest prowadzenie badań certyfikacyjnych dopuszczających napędy elektromechaniczne do stosowania w systemach ppoż. Z tego względu konieczna jest jednoznaczna identyfikacja badanego silownika w trakcie całego, długotrwałego procesu certyfikacji. W tym celu opracowano procedurę wprowadzania danych (rys. 5b) niezbędną do rozpoczęcia procesu badań.

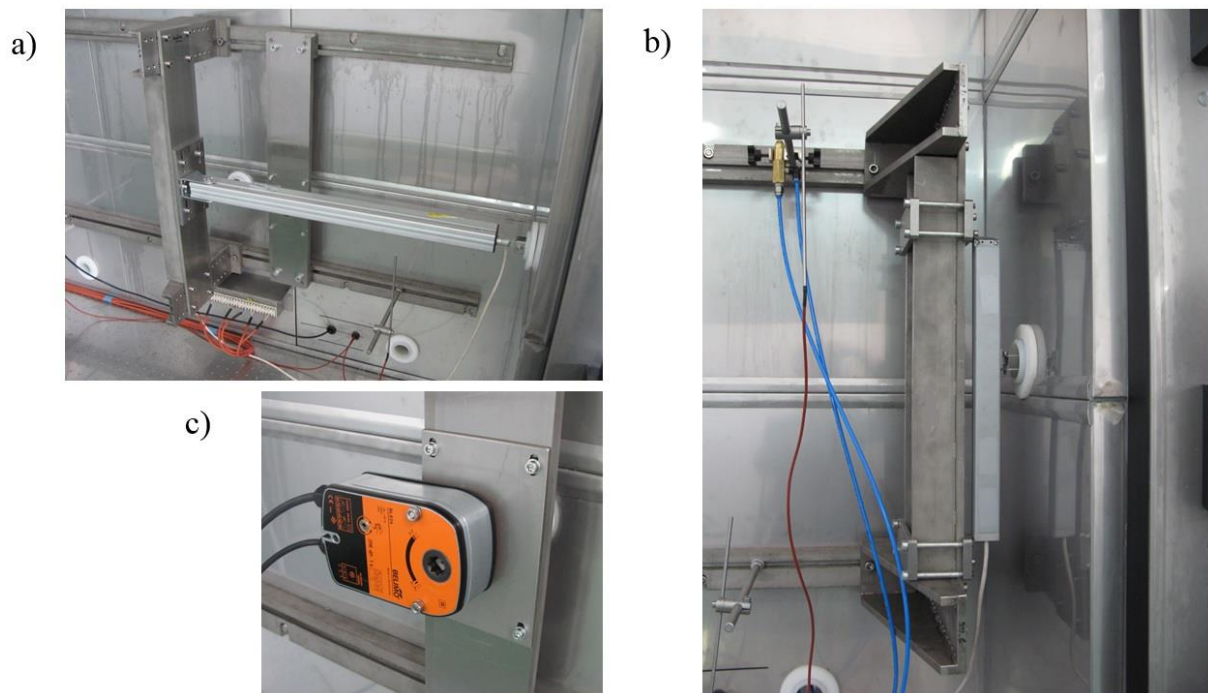
Użytkownik, po wprowadzeniu danych obiektu, ma możliwość sprawdzenia i zarejestrowania podstawowych parametrów pracy napędu istotnych z punktu widzenia rodzaju przyszłego zastosowania [30, 41] (rys. 5c):

- napięcie i prąd sterowania,
- czas wysuwania i wsuwania,
- skok,
- siła (moment siły) nominalna.

Kolejnym etapem związanym z procesem badawczym jest wybór odpowiedniej procedury (rys. 5d). Program w trybie domyślnym generuje zestaw parametrów wybranej procedury badawczej pozostawiając użytkownikowi ostateczną decyzję co do ich wartości.

7. Realizacja badań

Obiektami badań były wybrane napędy elektromechaniczne o różnej konstrukcji i przeznaczeniu. Napędy wrzecionowe (rys. 6a) znajdują zastosowanie do otwierania klap oddymiających, okien fasadowych, świetlików, szklanych konstrukcji dachowych, piramidki oraz okien połaciowych. Konstrukcja tych siłowników zapewnia dużą stabilność podczas pracy. Standardowo wyposażone są w krańcowe wyłączniki położenia oraz wyłączniki bezpieczeństwa w przypadku przeciążenia. Napędy łańcuchowe (rys. 6b) stosowane są do okien fasadowych, okien w połaci dachowej oraz klap przewietrzających. Wyposażone są w wyłączniki krańcowe, regulację siły zamykania i otwierania oraz możliwość regulacji odpowiedniej długości łańcucha. Siłowniki obrotowe (rys. 6c) w wersji ze sprężyną powrotną pozwalającą na samoczynną realizację ruchu przesłony do pozycji wynikającej z wymaganej przez system bezpieczeństwa przeciwpożarowego, wykorzystywane są do przestawiania przepustnic powietrza w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych budynków.



Rys. 6. Widok siłowników przygotowanych do badań w komorze termicznej stanowiska:
a) wrzecionowy, b) łańcuchowy, c) obrotowy.

W zależności od typu oraz konstrukcji badanego aktuatora zastosowano odpowiadające rzeczywistemu charakterowi pracy utwierdzenie obiektu do ramy adaptacyjnego systemu mocowania w stanowisku badawczym. Temperaturę siłownika ustalano na podstawie wskazań z dwóch punktów pomiarowych usytuowanych w pobliżu korpusu badanego siłownika. Wskazania podlegały weryfikacji z użyciem trzeciego czujnika umieszczonego w centralnej części przestrzeni badawczej komory badań.

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu temperatury pracy na czas ruchu organu roboczego napędu oraz pobór prądu elektrycznego przy stałym obciążeniu w zmiennych warunkach temperatury (Tab.1).

Tab. 1. Warunki badań

Typ napędu	Oznaczenie	Obciążenie	Temperatura [K]
Wrzecionowy	W	460 N	253 ±1
Łańcuchowy	L	105 N	293 ±1
Obrotowy	O	15 Nm	328 ±1

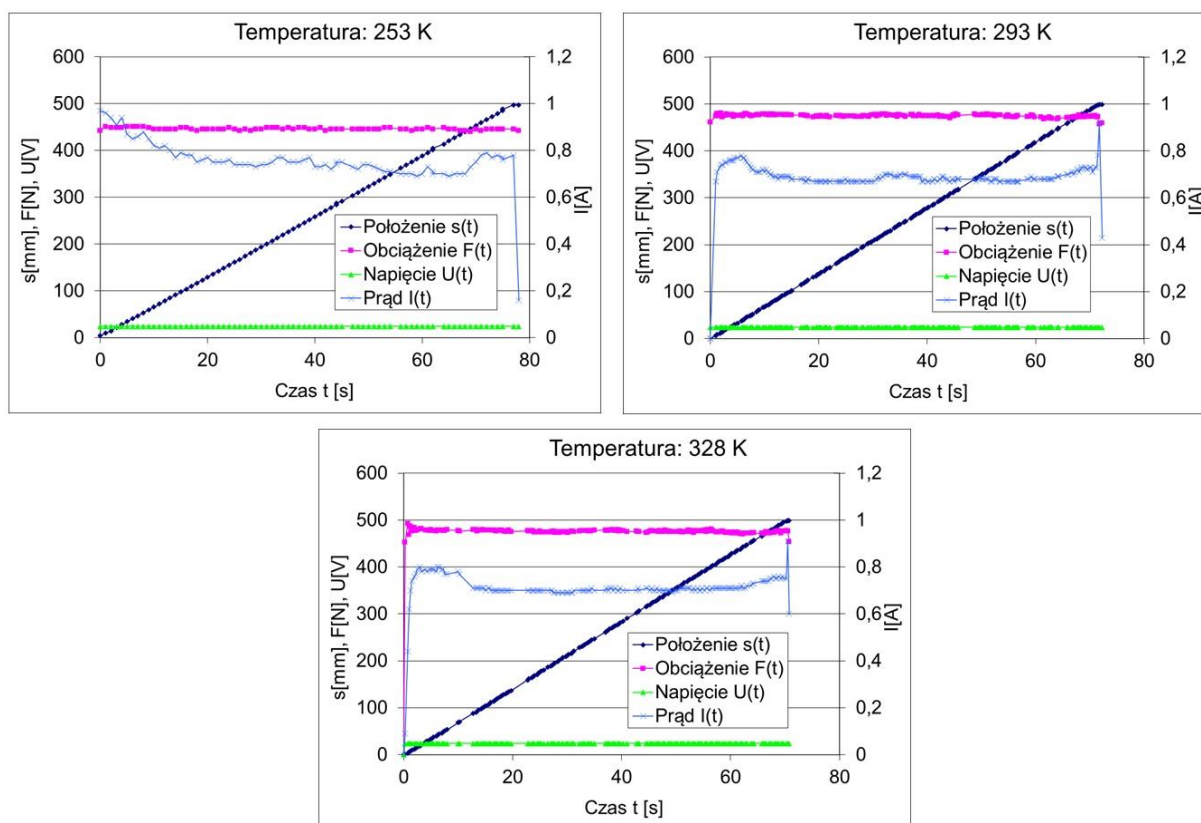
Badane siłowniki zasilane były prądem stałym o napięciu 24V. Badania prowadzono w zadanych temperaturach po dwugodzinnym okresie kondycjonowania zapewniającym osiągnięcie przez badany obiekt stałych warunków cieplnych w całej objętości.

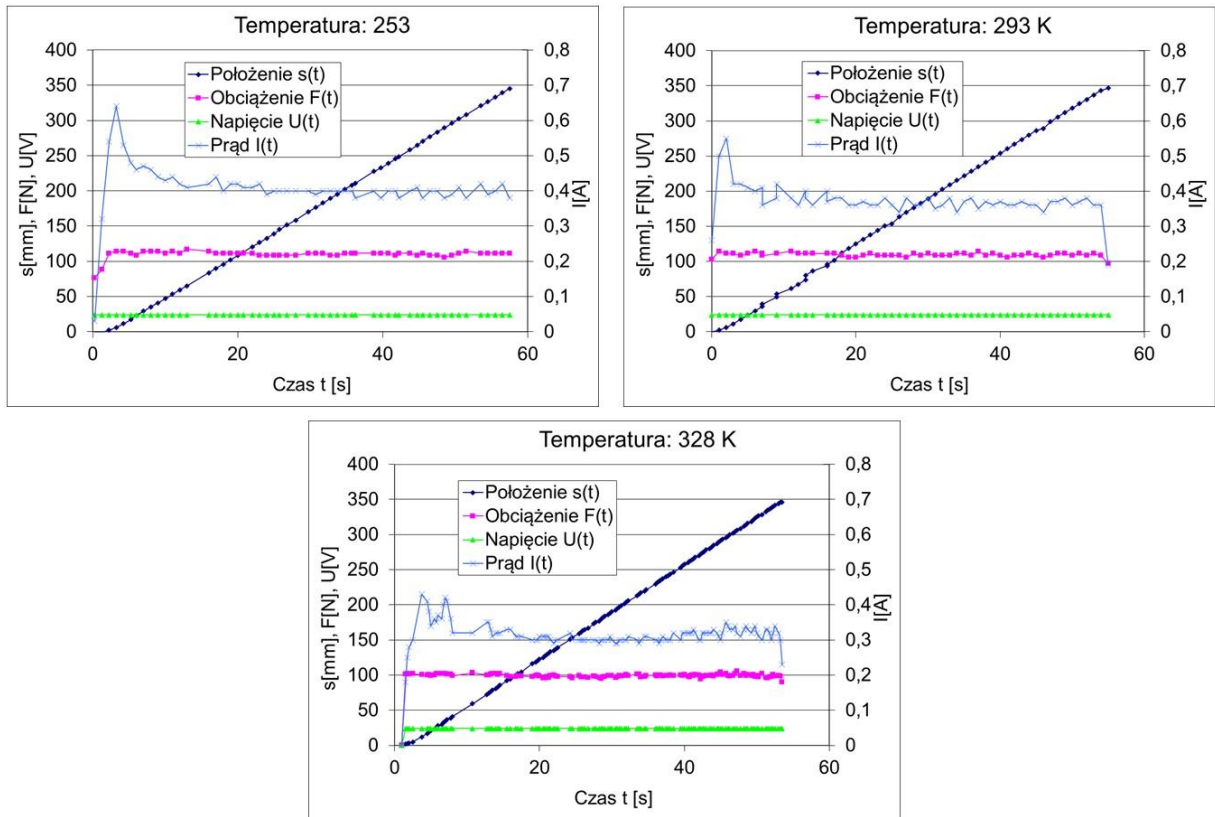
8. Wyniki badań

W trakcie badań rejestrowano podstawowe parametry decydujące o możliwości zastosowania testowanych aktuatorów w systemach oddymiania, do których należą: napięcie i natężenie prądu zasilania, przemieszczenie oraz obciążenie organu roboczego w funkcji czasu (rys. 7, rys. 8, rys. 9).

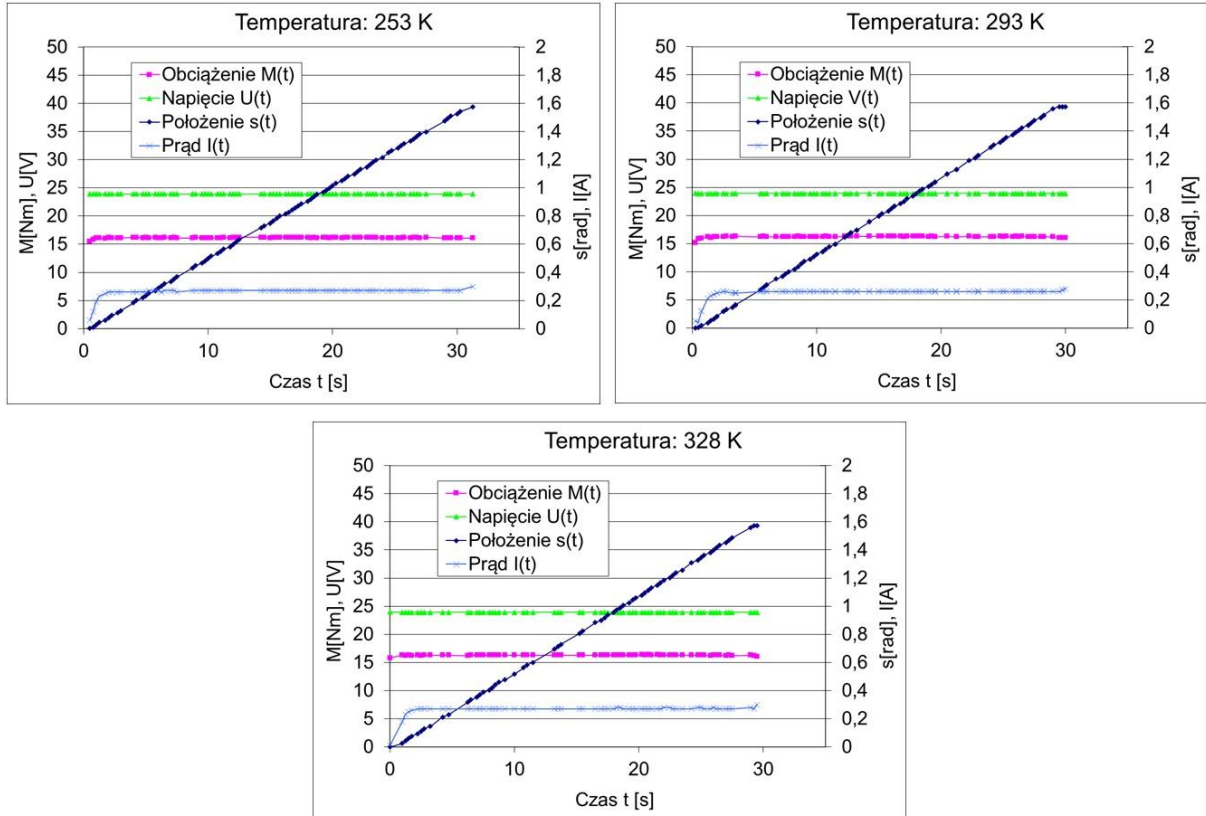
Ze względu na niewielką dynamikę pracy badanych siłowników, rejestrację danych pomiarowych prowadzono w sposób dyskretny, z częstotliwością próbkowania wynoszącą ok. 2 Hz, wystarczającą do przeprowadzenia niezbędnej analizy.

Oprogramowanie systemu badawczego umożliwia obserwację rejestrowanych charakterystyk w trybie on-line, co pozwala prowadzącemu badania na bieżącą kontrolę prawidłowości procesu. Przedstawione charakterystyki zostały opracowane w zewnętrznym oprogramowaniu do prowadzenia analiz wyników badań na podstawie danych zarchiwizowanych w plikach *.csv.

**Rys. 7.** Przykładowe charakterystyki pracy siłownika W



Rys. 8. Przykładowe charakterystyki pracy siłownika L



Rys. 9. Przykładowe charakterystyki pracy siłownika O

Obserwując przebieg zmian rejestrowanych parametrów pracy siłowników można wyodrębnić trzy obszary. Pierwszy obszar obejmuje czas od załączenia do początku ruchu o ustalonym charakterze, drugi ruch ustalony, trzeci strefę wyhamowywania w zakresie działania wewnętrznego układu bezpieczeństwa.

Siłowniki W i L w okresie ruchu początkowego charakteryzują się zwiększonym poborem prądu o nieliniowym przebiegu. Dodatkowo poziom wartości pobieranego prądu zależy od temperatury przeprowadzonego badania.

Charakterystyka prądowa siłownika O cechuje się stabilnym przebiegiem w całym zakresie roboczym urządzenia.

Fluktuacje oraz pojedyncze piki widoczne na wykresach charakterystyk prądowych świadczą o zmienności wewnętrznych oporów ruchu występujących podczas pracy siłownika.

Dla wszystkich badanych obiektów przemieszczenie opisuje charakterystyka liniowa, w której wartość przesunięcia jest wprost proporcjonalna do czasu zadziałania. Oznacza to, że przemieszczanie elementu wykonawczego odbywa się ruchem jednostajnym bez względu na chwilowe zmiany oporów ruchu.

Funkcje stałe opisujące wykresy charakterystyk zewnętrznego obciążenia siłowego oraz utrzymywanego napięcia zasilania jednoznacznie dokumentują stabilne warunki procesu wykonanych badań.

W celu zwiększenia czytelności otrzymanych wyników, na podstawie zarejestrowanych charakterystyk, wyznaczono wartości średnie poszczególnych parametrów (tab. 2, tab. 3, tab. 4) decydujących o możliwości zastosowania badanych napędów w systemach ochrony przeciwpożarowej.

Tab. 2. Parametry pracy napędów (temperatura: 293 K)

Oznaczenie	Skok [mm, rad]	Max. pobór prądu [A]		Czas [s]	
		otwieranie	zamykanie	otwieranie	zamykanie
W	500 ±0,5	0,78 ±0,01	0,20 ±0,01	72,3 ±0,5	59,1 ±0,5
L	346 ±0,5	0,55 ±0,01	0,09 ±0,01	55,8 ±0,5	70,8 ±0,5
O	4,7 ±0,01	0,26 ±0,01	0,03 ±0,01	30,0 ±0,5	20,5 ±0,5

Tab. 3. Parametry pracy napędów (temperatura: 55°C)

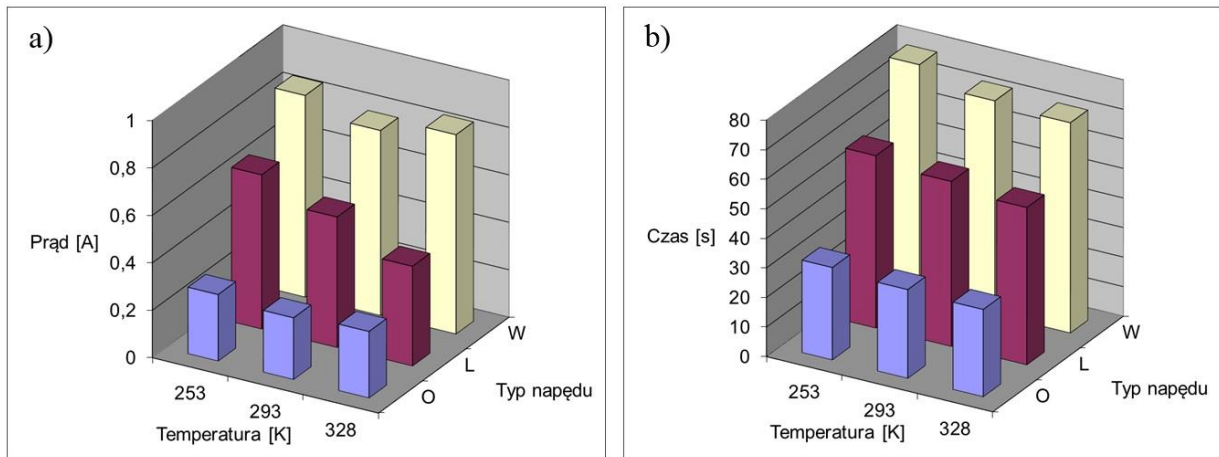
Oznaczenie	Skok [mm, rad]	Max. pobór prądu [A]		Czas [s]	
		otwieranie	zamykanie	otwieranie	zamykanie
W	500 ±0,5	0,84 ±0,01	0,25 ±0,01	71,1 ±0,5	55,3 ±0,5
L	346 ±0,5	0,42 ±0,01	0,09 ±0,01	53,2 ±0,5	69,1 ±0,5
O	4,7 ±0,01	0,28 ±0,01	0,12 ±0,01	29,5 ±0,5	19,5 ±0,5

Tab. 4. Parametry pracy napędów (temperatura: -20°C)

Oznaczenie	Skok [mm, rad]	Max. pobór prądu [A]		Czas [s]	
		otwieranie	zamykanie	otwieranie	zamykanie
W	500 ±0,5	0,85 ±0,01	0,30 ±0,01	78,3 ±0,5	63,2 ±0,5
L	346 ±0,5	0,65 ±0,01	0,15 ±0,01	58,3 ±0,5	72,5 ±0,5
O	4,7 ±0,01	0,26 ±0,01	0,06 ±0,01	31,5 ±0,5	24,8 ±0,5

9. Analiza wyników

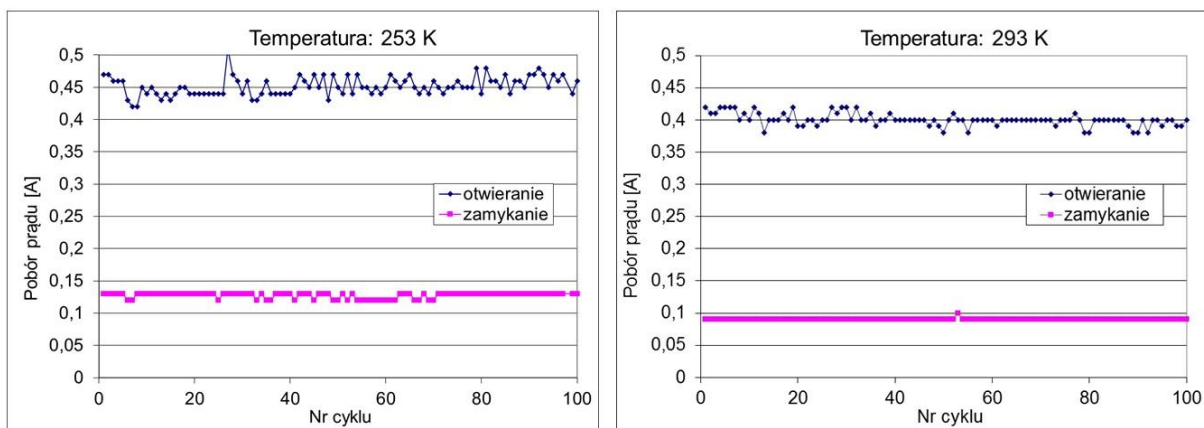
Zgodnie z procedurą badań definiowaną obowiązującymi przepisami [7], weryfikacja kontrolowanych parametrów pracy napędu dokonywana jest w warunkach odpowiadających temperaturze otoczenia. W tym przypadku dla wszystkich badanych obiektów nie zanotowano zmian przekraczających 5% wartości początkowej (rejestrowanej w temperaturze 293 K). Poddając analizie wyniki uzyskane w warunkach zmiennej temperatury pracy (w zakresie deklarowanym przez producenta) można jednak zauważyć, że zmiany badanych wielkości zachodzą na znacznie wyższym poziomie (rys. 10).



Rys. 10. Porównanie poboru prądu (a) oraz czasu ruchu (b) w zależności od temperatury pracy

W przypadku napędu wrzecionowego i obrotowego zakres zmienności maksymalnego poboru prądu (8,2%), jak i czasu ruchu podczas otwierania (7,7%) nie przekroczył dopuszczalnych 10% wartości wyjściowej. Natomiast w przypadku siłownika łańcuchowego zaobserwowano znaczny wzrost poboru prądu, przekraczający 15%, w warunkach pracy w temperaturze ujemnej.

Potwierdzeniem tej tendencji jest analiza poboru prądu w obszarze pracy ustalonej w trakcie badań trwałościowych prowadzonych w skrajnych temperaturach pracy (rys. 11).



Rys. 11. Porównanie średniego poboru prądu napędu łańcuchowego w ruchu ustalonym

Również w tym przypadku zaobserwowano podobną tendencję. W trakcie badań w temperaturze 253 K zarejestrowano wzrost średniego poboru prądu zarówno w trakcie otwierania (12%) jak i zamykania (42%).

Dodatkową informacją otrzymaną na podstawie przeprowadzonych badań, jest ocena skuteczności działania zabezpieczenia przeciążeniowego stosowanego w układzie sterującym badanych napędów. W niektórych przypadkach badanych egzemplarzy w warunkach podwyższonych temperatur stwierdzono zadziałanie zabezpieczenia pomimo braku wzrostu obciążenia powyżej wartości nominalnej. Jest to zjawisko nieprawidłowe, całkowicie wykluczające funkcjonowanie siłownika w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury spowodowanej pożarem.

10. Wnioski

Zapewnienie wymaganego poziomu bezpieczeństwa umożliwiającego niezawodne uruchomienie instalacji oddymiającej i ewakuację ludzi możliwe jest poprzez zastosowanie elektrycznych elementów wykonawczych charakteryzujących się stabilnym poziomem poboru energii elektrycznej, niezależnie od temperatury otoczenia. W przypadku pożaru cecha ta jest niezwykle istotna zwłaszcza, że ze wzrostem temperatury spada przewodność elektryczna przewodów powodująca nadmierny spadek napięcia zasilania.

Zastosowane w przeprowadzonym eksperymencie stanowisko badawcze umożliwiło wykonanie badań typowych siłowników elektrycznych o odmiennych rozwiązaniach konstrukcyjnych w warunkach jednoczesnych narażeń siłowych i termicznych. Zarejestrowane charakterystyki dokumentują występujące zróżnicowanie parametrów eksploatacyjnych poszczególnych konstrukcji siłowników. Wywołane narażenia termiczne umożliwiły określenie zakresu zmienności parametrów w zależności od temperatury środowiska pracy.

Wyniki badań testowanych napędów wskazują, że najmniejszy pobór prądu w grupie badanych siłowników występuje w temperaturze otoczenia. Spadek temperatury otoczenia powoduje istotny wzrost poboru prądu. W temperaturach podwyższonych konsumpcja energii nieznacznie wzrasta jedynie w przypadku siłownika obrotowego i wrzecionowego.

Stwierdzono, że czas zadziałania wszystkich badanych obiektów ulega skróceniu wraz ze wzrostem temperatury.

Wzrost poboru prądu aktuatora w niskich temperaturach otoczenia może być zjawiskiem niebezpiecznym szczególnie w budynku wielopiętrowym, w którym pożar został zainicjowany na niskich kondygnacjach w okresie zimowym. W tym przypadku zimne siłowniki kłap oddymiających znajdujących się na dachu lub poddaszu mogą wymagać zasilania energią elektryczną o parametrach, których nie może zapewnić niewydolna instalacja elektryczna, przegrzana na dolnych kondygnacjach.

Cenną informacją wynikającą z wykonanych testów jest także rezultat badań skuteczności działania zabezpieczenia przeciążeniowego. Tylko badania eksploatacyjne prowadzone w podwyższonych temperaturach umożliwiają rzetelną weryfikację tego ważnego parametru.

Na podstawie przeprowadzonych badań i zarejestrowanych wyników trzech, spośród wielu występujących na rynku typów, zasadna jest propozycja prowadzenia rozszerzonych badań atestacyjnych, w których charakterystyki eksploatacyjne siłowników rejestrowane są jednocześnie on-line w różnych temperaturach oddziałujących narażeń termicznych. Stanowi to istotną modyfikację obowiązujących przepisów, w myśl których charakterystyki są rejestrowane jedynie w temperaturze otoczenia po uprzednim nagraniu lub ochłodzeniu testowanego siłownika.

Głównym kierunkiem prac niezbędnych do zapewnienia niezawodności systemów oddymiania jest prowadzenie diagnostyki kompletnych systemów w warunkach i skali zbliżonych do rzeczywistych, co zostało zapewnione w opracowanym stanowisku oraz metodyce badań.

Zarejestrowane wyniki badań potwierdzają możliwość dodatkowego zastosowania stanowiska jako instrumentarium umożliwiającego prowadzenie testów weryfikacyjnych systemów diagnostyki i prognozowania zdolności eksploatacyjnej. Implementacja dodatkowych sensorów przyspieszeń rozszerzających możliwości diagnostyczne stanowić będzie kolejny etap prac związanych z rozwojem prowadzonych prac naukowych.

Ze względu na unikatowe możliwości odtwarzania zmiennych warunków w szerokim zakresie temperatur oraz wilgotności, stanowisko może być wykorzystywane także do badań siłowników stosowanych w lotnictwie, transporcie morskim i lądowym.

Podziękowanie: Pracę wykonano w ramach realizacji Projektu Strategicznego POIG.01.01.02-14-03/09 UE/NCBiR „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki”.

Literatura

1. Balaban E., Bansal P., Stoelting P., Saxena A., Goebel K., Curran S.: A diagnostic approach for electro-mechanical actuators in aerospace systems. Proceedings of the Aerospace conference IEEE, March 2009: 7-14
2. Balaban, E., Saxena, A., Goebel, K., Byington, C., Watson, M., Bharadwaj, S., ... & Amin, S. Experimental data collection and modeling for nominal and fault conditions on electro-mechanical actuators. Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009: 1-15.
3. Balaban, E., Saxena, A., Narasimhan, S., Roychoudhury, I., Goebel, K., & Koopmans, M.: Airborne Electro-Mechanical Actuator Test Stand for Development of Prognostic Health Management Systems. Proceedings of Annual Conference of the PHM Society. October 10-16, 2010: 1-13.
4. Balaban, E., Saxena, A., Narasimhan, S., Roychoudhury, I., Goebel, K. Experimental Validation of a Prognostic Health Management System for Electro-Mechanical Actuators. The American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA Infotech@ Aerospace Conference, 2011: 1-12.
5. Bodden, D., Clements N., Schley B., Jenney G.: Seeded Failure Testing and Analysis of an Electro-Mechanical Actuator. Proceedings of the Aerospace Conference IEEE, March 2007: 1-8.
6. Byington, C., Watson, M., Edwards D.; Stoelting P.: A model-based approach to prognostics and health management for flight control actuators. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, 2004: 3551 -3562.
7. Dziennik Ustaw - rok 2007 nr 143 poz. 1002.
8. Gałaj J., Jaskółowski W., Karpovič Z., Šukys R., Badanie wpływu impregnacji ogniochronnej na skład i ilość produktów toksycznych powstałych podczas spalania drewna sosnowego. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 2011; 3: 55-62.
9. Garinei A., Marsili R.: A new Diagnostic Technique for Ball Screw Actuators. Measurement, 2012; 45: 819–828.

10. Granovskiy E. A., Lyfar I. V. A., Vorona A. P., Barbuca M., Jarosz W., Modelowanie ewakuacji podczas pożarów budynków - analiza ryzyka. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2011; 4: 59-63.
11. He Yaping, Wang Jian, Wu Zhenkum, Hu Lu, Xiong Yi, Fan Weicheng: Smoke venting and fire safety in an industrial warehouse. *Fire Safety Journal* 2002; 37: 191-215.
12. Jensen S., Jenney G., Dawson D.: Flight test experience with an electromechanical actuator on the F-18 Systems Research Aircraft. *Digital Avionics Systems Conference DASC*, vol. 1, 2000: 1-10.
13. Jie Ji, Kaiyuan Li, Wei Zhong, Ran Huo. Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency. *Journal of Hazardous Materials*, 2010; 177: 209-215.
14. Koopmans, M., Hooven, R., Tumer, I.: Reliability based design recommendations for an electromechanical actuator test stand". *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 2010: 1-15.
15. Koopmans, M. T., Tumer, I. Y: Electromechanical Actuator Test Stand Coupling Design to Support Actuator Prognostic Model Development. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences*, 2011: 1285-1296.
16. Koopmans, M. T., Tumer, I. Y.: Function-based analysis and redesign of a flyable electromechanical actuator test stand. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 2010: 1-12.
17. Kozioł S., Matras E., Zbrowski A.: Modular system for testing the stability and safety of specialised height rescue vehicles. *Solid State Phenomena*. 2013; 199: 55-60.
18. Kozioł S., Zbrowski A.: Metoda poprawy bezpieczeństwa budynków poprzez zastosowanie odzysku ciepła w układach wentylacji pożarowej. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2012; 3: 39-45.
19. Kubicki G.; Wiche J.: Safety Way® – pierwszy inteligentny system ochrony przed zadymieniem dróg ewakuacji. *Ochrona Przeciwożarowa* 2010; 3: 24-26.
20. Longoria, R. G., LeSage, J., Shutt W.: Modeling and Requirements Formulation for Submarine Control Surface Actuation Systems. *American Society of Naval Engineers Day* 2010: 8-9.
21. Matuszewski P, Żybura R.: Testowanie przeciwpożarowych klap odcinających a bezpieczeństwo budynku. *Chłodnictwo i Klimatyzacja* 2010; 6: 67-68.
22. Mazur D.: Elektryczne napędy - nowe możliwości. *Świat Szkła* 2006; 1: 24-46.

23. Mazurkiewicz A. (kierownik): Projekt Strategiczny POIG.01.01.02-14-03/09 UE/NCBiR „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki”.
24. Mizieliński B. Systemy oddymiania budynków, WNT, Warszawa 1999.
25. Narasimhan S., Roychoudhury I., Balaban E. , Saxena. A.: Combining Model-Based and Feature-Driven Diagnosis Approaches A Case Study on Electromechanical Actuators. 21st International Workshop on Principles of Diagnosis, 2010: 1–8.
26. Norma EN 12101-2: Systemy kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła, cz.2: Wymagania techniczne dotyczące klap dymowych.
27. Owens K i inni: Electromechanical Actuator Test Apparatus. US Patent No 7775120B2. 17 Aug, 2010.
28. Półka M., Analiza toksyczności produktów rozkładu termicznego i spalania uzyskanych z wybranych materiałów epoksydowych. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 2010; 3: 73-82.
29. Samborski T., Zbrowski A., Kozioł S.: Modelowy system do badań osłon przeciwwietrznych z czujkami dymu. Technologia i Automatykacja Montażu 2012; 3: 33-39.
30. Sawicki J. Wytyczne sterowania urządzeniami przeciwpożarowymi. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza nr 2007; 2: 75-90.
31. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2008 Edition.
32. Sitarz G.: Zastosowanie pneumatyki w budownictwie - Klapy Dymowe. Pneumatyka 2013; 1: 26-27.
33. Skiepmo E.: Ciągłość dostawy energii i przekazu sygnału w instalacjach funkcjonujących w warunkach pożaru. Elektro Info 2012; 10: 12-57.
34. Skiepmo E.: Instalacje elektryczne funkcjonujące w warunkach pożaru. Elektro Info 2006; 3: 54-57.
35. Skiepmo E.: Wymagania dla instalacji elektrycznych funkcjonujących w czasie pożaru. Elektro Info 2009; 4: 60-66.
36. Skiepmo E.: Zasady projektowania sterowań instalacji do odprowadzania dymu i ciepła. Elektro Info 2008; 1-2: 82-88.
37. Sypek G., Wiche J.: Temperatura a systemy ochrony przed zadymieniem pionowych dróg ewakuacji. Ochrona Przeciwpożarowa 2009; 12: 39-40.
38. Tesar D., Krishnamoorthy G.: Intelligent Electromechanical Actuators to Modernize Ship Operations. Naval Engineers Journal, 2008; 120: 77-88.

39. Wiatr J., Jaskółowski W.: Wpływ pożaru na wartość napięcia zasilającego urządzenia elektryczne, które muszą funkcjonować w czasie pożaru. *Elektro Info* 2012; 1-2: 76-83.
40. Wiatr J., Skiepmo E.: Zasady doboru przewodów elektrycznych w instalacjach oddymiających. *Elektro Info* 2011; 3: 80-85.
41. Wiatr J.: Wpływ temperatury pożaru na wartość napięcia zasilającego urządzenia elektryczne oraz skuteczność ochrony przeciwporażeniowej urządzeń, które muszą funkcjonować w czasie pożaru. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 2012; 2: 37-44.
42. Wicks E.: System and method for smoke free elevator shaft. United States Patent 5718627. Feb. 17, 1998.
43. Wierciak, J., Szykiedans, K., Rawski, J., Lisicki J.: System pomiarowy do wyznaczania charakterystyk elektrycznych siłowników liniowych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2007; 9bis: 527-530.
44. Zbrowski A., Samborski T., Koziół S.: Research and test apparatus for certification testing in technical rescue systems. *Problemy Eksploatacji* 2010; 3: 127-138.