

Krzysztof GŁYDA, Andrzej SZELMANOWSKI, Jarosław SULKOWSKI,
 Andrzej PAZUR
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych (Air Force Institute of Technology)

FAŁSZYWE ZADZIAŁANIA LOTNICZEGO SYSTEMU PRZECIWOŻAROWEGO WYWOŁANE ZAKŁÓCENIAMI W OBWODACH ZASILANIA

False actions of the aviation fire protection system caused by disturbances in power circuits

Streszczenie: *W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych lotniczego systemu przeciwpożarowego SSP-FK oraz identyfikacji głównych przyczyn jego fałszywego zadziałania na wielu samolotach i śmigłowcach Sił Zbrojnych RP przy wykorzystaniu zbudowanego w ITWL symulatora diagnostycznego. Omówiono wyniki wykonanych analiz statystycznych, wskazujących na bloki wykonawcze jako kluczowe w fałszywym sygnalizowaniu pożaru. Zaprezentowano wybrane wyniki badań opracowanego modelu symulacyjnego bloku wykonawczego w warunkach zakłóceń występujących w jego obwodach zasilania (w szczególności chwilowych spadkach napięcia). Wskazano na efektywność zaprezentowanej metody badań przy użyciu modelu symulacyjnego systemu przeciwpożarowego, który może być wykorzystany do szkolenia służby inżynieryjno-lotniczej i pilotów oraz wsparcia pracy Komisji Badania Wypadków Lotniczych.*

Słowa kluczowe: lotniczy system przeciwpożarowy, symulator diagnostyczny

Abstract: *The article presents the results of simulation tests of the SSP-FK aviation fire protection system and the identification of the main causes of its false operation on many airplanes and helicopters of the Polish Armed Forces with the use of a diagnostic simulator built at ITWL. The results of the performed statistical analyzes pointing to the execution blocks as the key factors in false fire signaling are discussed. Selected test results of the developed simulation model of the actuator unit under the conditions of disturbances occurring in its supply circuits (in particular instantaneous voltage drops) are presented. The effectiveness of the presented test method with the use of a simulation model of a fire protection system, which can be used to train the engineering and aviation service and pilots, and to support the work of the Aircraft Accident Investigation Commission, was pointed out.*

Keywords: avionic suspension fire system, diagnostic simulator

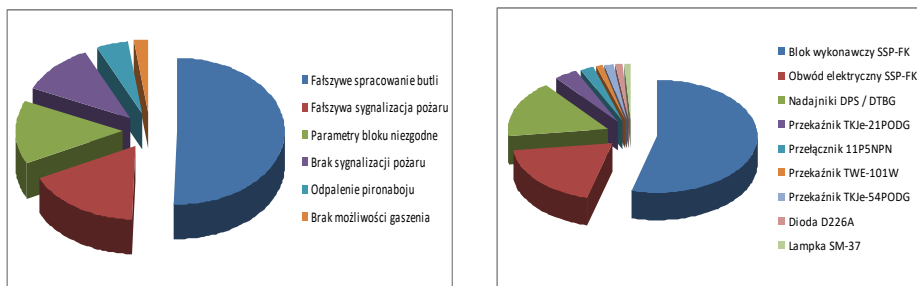
1. Wstęp

Lotniczy system przeciwpożarowy (zwany też instalacją przeciwpożarową) jest to zabudowany na statku powietrznym zespół urządzeń służący do wykrywania, sygnalizacji i gaszenia pożaru [4]. Składa się głównie z czujników pożaru, bloków wykonawczych (z wbudowaną logiką działania), kolektorów rozpylających, butli gaśniczych oraz elementów sterowania i sygnalizacji informacji o pożarze załogę statku powietrznego.

Przykładem rozbudowanego lotniczego systemu przeciwpożarowego jest system SSP-FK, zabudowany na wielu typach statków powietrznych eksploatowanych w Siłach Zbrojnych RP, m.in. na samolotach An-28 (w wersji M-28 Bryza) oraz śmigłowcach z rodziny Mi-8/14/17/24 i W-3/WA/PL [5, 11]. System SSP-FK zapewnia sygnalizację wystąpienia pożaru na pokładzie statku powietrznego oraz realizuje proces jego gaszenia w trybie automatycznym (bez udziału pilota) lub trybie ręcznym (z udziałem pilota). Do realizacji funkcji automatycznego wykrywania i gaszenia pożaru stosowane są bloki wykonawcze, zawierające elektroniczne płytki wzmacniaczy, które przetwarzają sygnały otrzymywane z termoelektrycznych czujników pożaru [5]. Wysoka niezawodność systemu przeciwpożarowego SSP-FK jest zapewniana poprzez wykonywanie obsług bieżących i obsług okresowych przez personel techniczny. Podczas przygotowania statku powietrznego do lotu sprawdzane są obwody sygnalizacji pożaru, ciśnienie w butlach gaśniczych oraz zabezpieczenie piroglowic w tych butlach. W obsługach okresowych sprawdzane są dodatkowo: stan przewodów i połączeń magistrali rozprowadzającej czynnik gaśniczy, stan napełnienia butli gaśniczych, działanie obwodów wykonawczych (bez używania czynnika), a także wykonywane jest czyszczenie przewodów i zaworów przeciwpożarowych, przedmuchiwanie powietrzem kolektorów, sprawdzenie działania czujników pożaru i zabezpieczenie systemu przed przypadkowym włączeniem [5].

Liczne przypadki nieprawidłowej pracy systemu przeciwpożarowego SSP-FK, m.in. zdarzenia analizowane w ramach Komisji Badania Wypadków Lotniczych powołanej do ustalenia przyczyn samoczynnego uruchomienia butli gaśniczej samolotu An-28 w czasie zmiany wysokości lotu oraz samoczynnego uruchomienia butli gaśniczej śmigłowca Mi-8 na ziemi, wymusiły opracowanie komputerowych metod analizy właściwości i badania warunków fałszywego zadziałania jego wybranych elementów [4].

W systemach informatycznych IT gromadzących informacje o niesprawnościach statków powietrznych w Siłach Zbrojnych RP [1, 4, 9] odnotowane są liczne przypadki samoczynnego, fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK włącznie z uruchomieniem butli gaśniczych. Szczegółowe analizy okoliczności i przyczyn tych zdarzeń wskazują na potrzebę naukowego wsparcia personelu technicznego i latającego eksploatującego ten typ systemu przeciwpożarowego ze względu na jego nadrzędną rolę na pokładzie statku powietrznego. Do oceny statystycznej fałszywego zadziałania systemu wykorzystano dane zawarte w systemie informatycznym SI SAMANTA [9]. Wyniki analizy niesprawności systemu przeciwpożarowego SSP-FK wykonane w ITWL wykazały, że udział przypadków fałszywego zadziałania systemu wynosi 67%, a udział w nich bloków wykonawczych SSP-FK-BI i BI-2A wynosi 58% (rys. 1).



Rys. 1. Udział przypadków fałszywego zadziałania systemu SSP-FK (po lewej) i udział elementów składowych tego systemu zakwalifikowanych jako ich przyczyny (po prawej) [4]

Na potrzeby badań numerycznych opracowane zostały modele symulacyjne obwodów elektrycznych płytek wzmacniaczy bloków wykonawczych SSP-FK-BI, przy wykorzystaniu pakietu oprogramowania Circuit-Maker [3, 10]. Wykonano modelowanie właściwości torów sygnałowych bloku wykonawczego, a następnie określono warunki jego fałszywego zadziałania podczas występowania zakłóceń w jego zasilaniu odpowiadających zakłóceniom na pokładzie statku powietrznego [2, 16].

Dodatkowo wykonano badania modeli symulacyjnych czujników pożaru, przy wykorzystaniu pakietu oprogramowania Matlab-Simulink [7, 13]. Badania miały na celu sprawdzenie możliwości generacji napięcia uruchamiającego system SSP-FK na skutek zmian temperatury otoczenia. Określono wartości sygnału wyjściowego z czujników DPS dla założonych warunków termicznych (oddziaływanie zimnego i ciepłego powietrza z otoczenia, podmuch gorącego powietrza z rozpraszaczy gazów wylotowych EWU, podmuch gorącego powietrza z pieca grzewczego KO-50).

Eksperymentalna weryfikacja wyników badań numerycznych modelu symulacyjnego funkcjonowania bloków wykonawczych typu SSP-FK-BI z termoelektrycznymi czujnikami pożaru typu DPS lub DTBG miała na celu sprawdzenie wystąpienia fałszywego zadziałania bloku w warunkach spadków napięcia jego zasilania (przy występowaniu sygnału podprogowego z czujników pożaru) oraz podczas zwarcia pomiędzy wybranymi obwodami na płycie wzmacniaczy bloku wykonawczego (dla rezystancji zwarcia utworzonej z kropli wody przewodzącej powstałej na skutek zjawiska kondensacji w obudowie bloku). Jednym z jej celów praktycznych było także określenie sposobu wykrywania możliwości fałszywego zadziałania systemu SSP-FK i wprowadzenia działań profilaktycznych [4, 16].

Do weryfikacji wyników uzyskanych w badaniach numerycznych wykorzystano informacje z wcześniejszych ekspertyz wykonanych przez ITWL [12, 15, 16], w ramach których przeprowadzono sprawdzenie wartości siły termoelektrycznej generowanej na wyjściu czujników pożaru podczas pracy pieca grzewczego KO-50. Następnie wykonano badania wrażliwości bloku wykonawczego SSP-FK-BI na chwilowe spadki napięcia zasilania pokładowego (rys. 2) podczas „zimnego” i „gorącego” rozruchu silników śmigłowca Mi-8 [4].

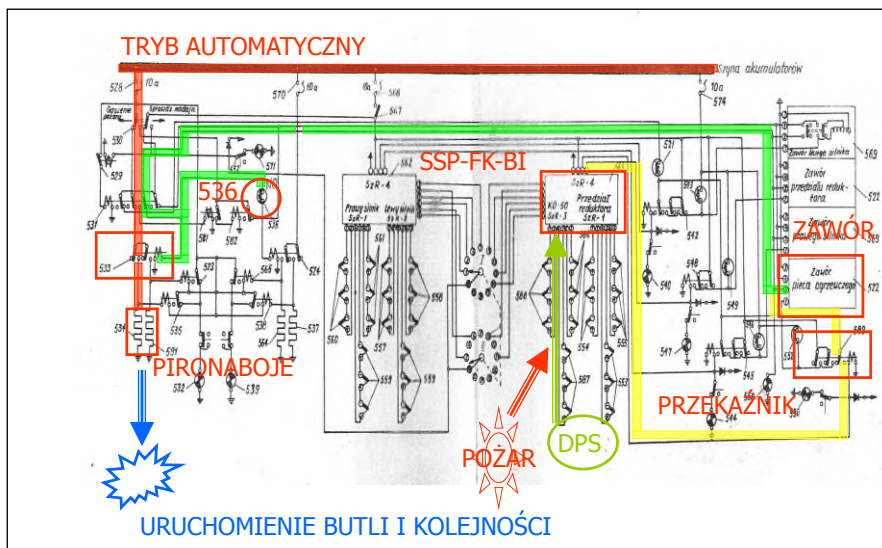


Rys. 2. Schemat sposobu generacji sygnału pożaru przez system SSP-FK na śmigłowcu Mi-8 [4]

Prace weryfikacyjne, zrealizowane w ramach ekspertyzy wykonanej przez ITWL [16] na badanym śmigłowcu Mi-8, wykazały możliwość fałszywego zadziałania systemu SSP-FK od chwilowych zakłóceń w zasilaniu pokładowym przy występowaniu siły termoelektrycznej z czujników pożaru o wartości podprogowej. Sygnał generowany z czujnika podawany jest do bloku wykonawczego, gdzie jest porównywany do napięcia odniesienia. W przypadku jego przewyższenia, blok wykonawczy generuje sygnał pożaru, przekazywany do przekaźnika wykonawczego TKE-54PODG, który uruchamia blok zaworów BZ 781100 (komutacja połączeń magistrali) oraz pulpit sygnalizacji pożaru umieszczony w kabinie pilotów (informacja dla załogi). Podawany jest jednocześnie sygnał na piroglówce butli I kolejności gaszenia (inicjujący proces gaszenia).

2. Działanie systemu SSP-FK dla zakłóceń w zasilaniu

System przeciwpożarowy SSP-FK na śmigłowcu Mi-8 może pracować w dwóch trybach: automatycznym lub ręcznym (z udziałem pilota) [4, 5]. Działanie systemu przeciwpożarowego SSP-FK na pokładzie śmigłowca Mi-8 w trybie automatycznym można przedstawić za pomocą ogólnego schematu ideowego (rys. 3), przedstawiającego elementy systemu biorące udział w automatycznym (bez wiedzy pilota) wykrywaniu i sygnalizacji pożaru oraz uruchomieniu układu gaszenia. W trybie tym elementem sterującym są bloki wykonawcze SSP-FK-BI, które w przypadku wykrycia pożaru na pokładzie śmigłowca realizują uruchomienie butli I kolejności gaszenia [5].



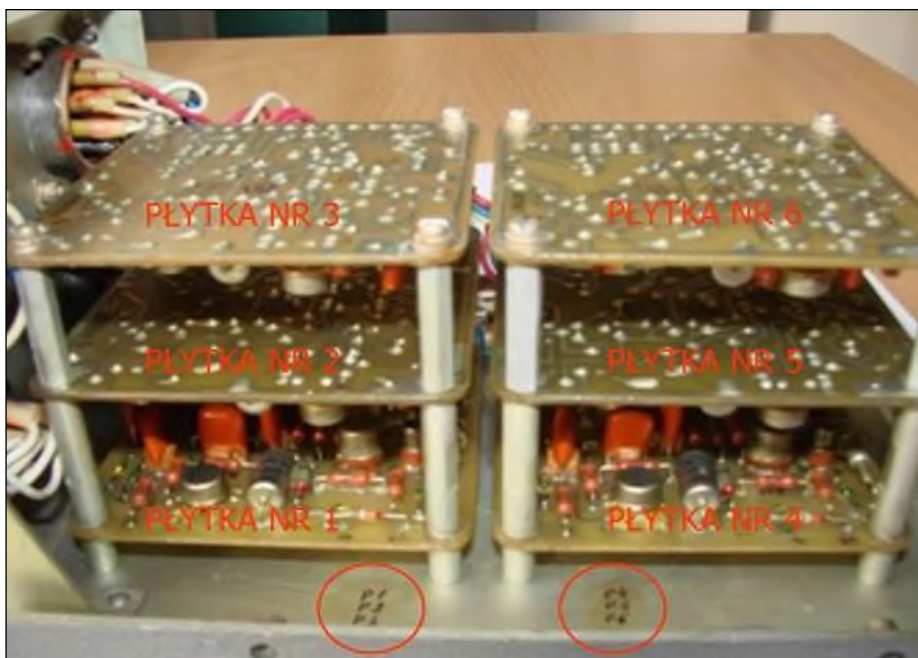
Rys. 3. Schemat ideowy działania systemu SSP-FK na śmigłowcu Mi-8 [4]

Działanie systemu przeciwpożarowego SSP-FK na pokładzie śmigłowca spełnia oczekiwane funkcje w następujący sposób: termoelektryczne czujniki pożaru DPS generują siłę termoelektryczną, która (w postaci napięcia prądu stałego) podawana jest na wejście komparatora na płycie wzmacniaczy w bloku wykonawczego SSP-FK-BI [12]. Układ elektroniczny płytki pełniący funkcję komparatora sygnałów porównuje napięcie generowane z grupy czujników DPS z napięciem odniesienia generowanym w bloku wykonawczym. W przypadku pojawienia się pożaru w dozorowanym przedziale na pokładzie śmigłowca, w momencie gdy chwilowa wartość napięcia przychodzącego z grupy czujników DPS jest większa od wartości napięcia odniesienia, generowany jest sygnał wyjściowy „POŻAR” z bloku wykonawczego i rozpoczyna się proces uruchamiający układ sygnalizacji pożaru w postaci informacji obrazowanej dla załogi (zaświeci lampka „POŻAR” na tabliczce sygnalizacyjnej). Jednocześnie, poprzez podanie zasilania do przełącznika wykonawczego, bloku zaworów i pirogłówek butli I kolejności gaszenia, uruchamiany jest układ gaszenia pożaru w dozorowanym przedziale [5].

Głównym elementem składowym lotniczego systemu przeciwpożarowego typu SSP-FK jest elektroniczny blok wykonawczy SSP-FK-BI (dla śmigłowców z rodziny Mi-8/14/17/24 i W-3/A/WA/PL) lub blok BI-2A (dla samolotów An-28) [5, 11]. Bloki wykonawcze są urządzeniami progowymi sterowanymi napięciowo z czujników DPS lub DTBG. W przypadku podania na wejście bloku napięcia większego niż próg zadziałania (odpowiadającego powstaniu pożaru) na wyjściu bloku pojawia się sygnał 28,5 V uruchamiający układ gaszenia pożaru. Sygnał ten trwa tak długo, póki napięcie na wejściu bloku nie zmniejszy się do wartości progowej zadziałania, tj. 28 mV [12].

Na pokładzie śmigłowca Mi-8 blok wykonawczy SSP-FK-BI jest przeznaczony do wykrywania pożaru w dozorowanych strefach wydzielonych (przedział silnika prawego i silnika lewego, reduktora przekładni głównej oraz pieca grzewczego KO-50), sterowania gaszeniem oraz powiadamiania załogi o wystąpieniu pożaru [4, 5].

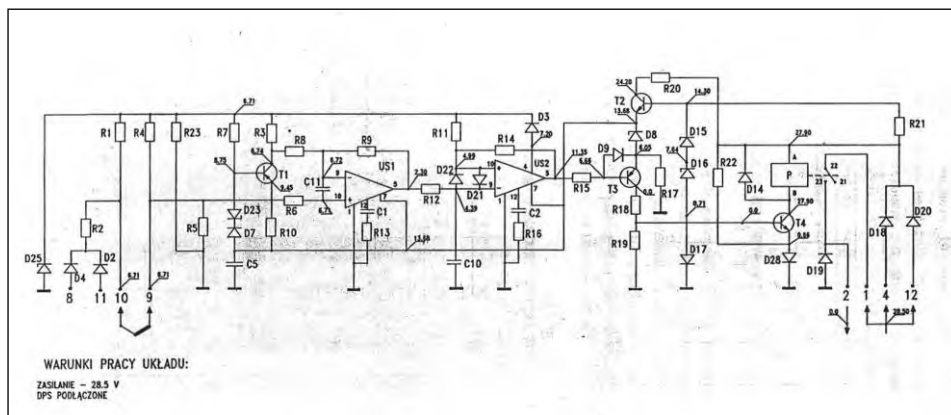
Każdy blok wykonawczy (zarówno SSP-FK-BI jak i BI-2A) zawiera 6 identycznych płytek wzmacniaczy (rys. 4) z elementami elektronicznymi, z których każda kontroluje oddzielną grupę termoelektrycznych czujników pożaru (3 czujniki połączone szeregowo). W ten sposób każda płytka wzmacniaczy w bloku wykonawczym stanowi oddzielny, niezależny kanał wykrywania pożaru [4, 5].



Rys. 4. Płytki wzmacniaczy zabudowane w bloku wykonawczym systemu SSP-FK [4]

Według opracowanego w ITWL schematu ideowego płytki wzmacniaczy (rys. 5), zweryfikowanego w ramach ekspertyzy realizowanej na rzecz Komisji Badania Wypadków Lotniczych [12], zasilanie pokładowe 28,5 V na śmigłowcu Mi-8 podawane jest do końcówek zasilania każdej płytki wzmacniaczy.

Dla każdej płytki „plus” zasilania podawany jest na końcówki 1, 4 i 12 złącza płytki, natomiast „minus” zasilania na końcówkę 7 złącza płytki. Napięcie zasilania 28,5 V poprzez końcówkę 1 podawane jest na styk 21-22 przełącznika wykonawczego RES-52 płytki i w ten sposób przygotowany zostaje obwód podawania sygnału o pożarze. Sterowanie zasilaniem tego przełącznika odbywa się za pomocą tranzystora T4 [12].



Rys. 5. Schemat ideowy płytki wzmacniaczy bloku wykonawczego systemu SSP-FK [4]

W przypadku wystąpienia rzeczywistego pożaru w dozorowanej strefie na śmigłowcu Mi-8 sygnał wyjściowy „POŻAR” z bloku wykonawczego pojawi się na końcówce 2 płytki wzmacniaczy, a następnie poprzez złącze Sz4 podawany jest do układów wykonawczych instalacji sygnalizacji i gaszenia pożaru. Napięcie zasilania podawane jest poprzez końcówki 4 i 12 na styk A uzwojenia sterującego przełącznika RES-52. Styk B tego uzwojenia połączony jest z kolektorem tranzystora T4. Diody D18 i D20 zabezpieczają układ przed podaniem napięcia zasilającego o odwrotnej polaryzacji. Diody D14 i D19 zabezpieczają obwody przed impulsami przepięciowymi.

Tranzystor T2 wraz z diodami Zenera D15 i D16 oraz diodą D8 stanowi źródło stabilizowanego napięcia zasilającego wzmacniacze operacyjne: komparator sygnałów US1 i wzmacniacz różnicowy US2. Tranzystor T1 wraz z diodą Zenera D23 i diodą D7 stanowi źródło napięcia odniesienia podawanego na wejście odwracające 9 komparatora US1. Napięcie stabilizowane przez diodę Zenera D25 jest podawane przez rezystory R1 i R4 na końcówki 9 i 10 płytki wzmacniaczy. Podnosi ono potencjał wejść 9 i 10 układu czujników DPS i w ten sposób zabezpiecza układ przed przypadkowym uruchomieniem. Gdyby potencjał wejść 9 i 10 był zerowy, to układ mógłby zostać uruchomiony przypadkowym wzrostem potencjałów tych wejść pochodzącym np. od części pławcowej statku powietrznego (próg zadziałania układu wynosi 28 mV).

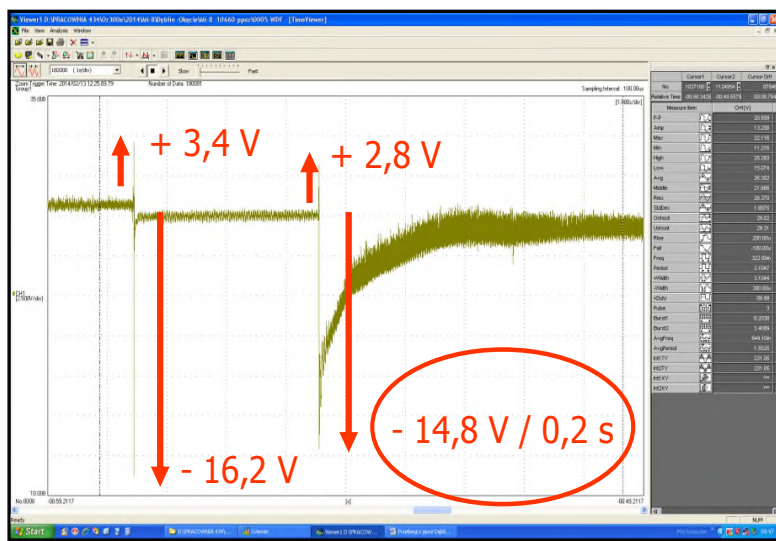
W przypadku pojawienia się chwilowych spadków napięcia zasilania w sieci pokładowej (wywołanych np. włączeniem odbiorników dużej mocy) następuje obniżenie napięcia odniesienia, co stwarza sytuację do pojawienia się możliwości fałszywego zadziałania komparatora w przypadku, gdy z czujników pożaru generowany jest sygnał napięciowy o wartości podprogowej (mniejszej niż 28 mV).

Przedstawione schematy posłużyły do opracowania modeli symulacyjnych bloków wykonawczych SSP-FK-BI w celu określenia poziomów i kształtu zakłóceń elektrycznych uruchamiających proces gaszenia oraz warunków generacji w układzie zasilania tych bloków [4, 16].

3. Charakterystyka zakłóceń w sieci pokładowej Mi-8

W układzie rzeczywistym na pokładzie śmigłowca Mi-8 zasilanie pokładowe 28,5 V zawiera wiele chwilowych zakłóceń (spadków napięcia i przepięć) wywołanych włączeniem lub wyłączeniem odbiorników dużej mocy (m.in. prądorozrusznika GS-18TP, instalacji przeciwołodziowej lub wentylatora pieca grzewczego KO-50). Takie napięcie zasilania, zawierające chwilowe zakłócenia, podawane jest do końcówek zasilania 1, 4 i 12 złącza każdej z 6 płytek wzmacniaczy poprzez zaciski złącza Sz4 bloku wykonawczego SSP-FK-BI.

Badania modelowe warunków przekroczenia przez sygnał z czujnika pożaru wartości napięcia odniesienia podawanego na wejście komparatora US1 wykonano dla znamionowego napięcia zasilania bloku wykonawczego SSP-FK-BI z chwilowymi spadkami napięcia -16,2 V i -14,8 V względem napięcia zasilania +28,5 V (rys. 6).



Rys. 6. Spadki napięcia zasilania systemu SSP-FK podczas „zimnego” rozruchu silnika [4]

Na podstawie analizy wyników pomiarów [16], wykonanych podczas badań systemu przeciwpożarowego SSP-FK na pokładzie śmigłowca Mi-8 przy napięciu zasilania 28,5 V z lotniskowego źródła zasilania APA-5 w czasie wykonywania „zimnego” rozruchu silnika śmigłowca w obwodzie zasilania bloku SSP-FK-BI w chwili włączenia prądorozrusznika GS-18TP, stwierdzono występowanie impulsów zanikowych o wartości maksymalnej -16,22 V / 10 ms (chwilowe napięcie zasilania bloku wynosiło 12,28 V) oraz -14,80 V / 200 ms (chwilowe napięcie zasilania bloku wynosiło 13,70 V).

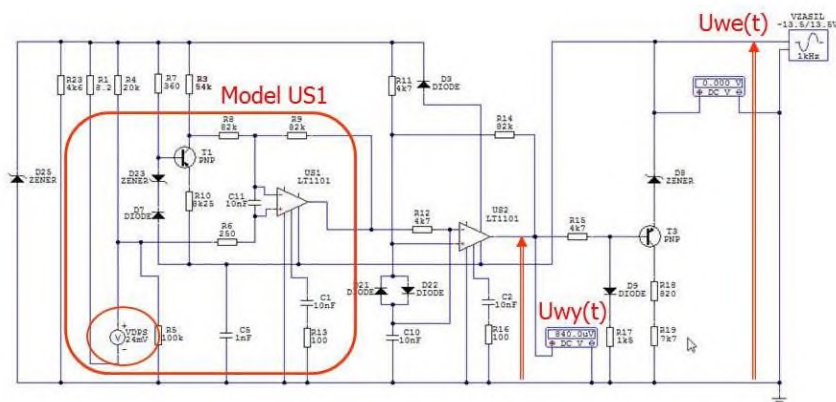
W czasie wykonywania „gorącego” rozruchu silnika śmigłowca w obwodzie zasilania bloku SSP-FK-BI w chwili włączenia prądorozrusznika GS-18TP i przełączania

jego obwodów elektrycznych stwierdzono występowanie impulsów zanikowych o wartości maksymalnej $-16,92 \text{ V} / 100 \text{ ms}$ (chwilowe napięcie zasilania bloku wynosiło $11,58 \text{ V}$) i $-14,08 \text{ V} / 500 \text{ ms}$ (chwilowe napięcie zasilania bloku wynosiło $14,42 \text{ V}$). Natomiast w czasie badań włączania wentylatora pieca KO-50 stwierdzono, że w obwodzie zasilania bloku SSP-FK-BI pojawiały się impulsy zanikowe o wartości $-12,30 \text{ V} / 300 \text{ ms}$ (chwilowe napięcie zasilania bloku wynosiło $16,20 \text{ V}$).

Do prezentacji możliwości modelowania działania płytki wzmacniaczy w warunkach zakłóceń zastosowano przebiegi okresowe charakteryzujące spadki napięcia w zasilaniu płytki o wartości impulsu $-14,80 \text{ V}$ i czasie trwania 200 ms (rys. 6). Powyższe wartości stały się podstawowymi danymi przyjętymi w programie Circuit-Maker do określenia warunków zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK przy spadkach napięcia i występowaniu siły termoelektrycznej generowanej z czujników pożaru.

W zbudowanym schemacie symulacyjnym działania płytki wzmacniaczy do modelowania sygnału z czujników DPS wykorzystano gotowy element w postaci modelu źródła napięciowego z nastawianą wartością napięcia stałego 24 mV [4, 10]. Do modelowania zmian napięcia zasilania bloku wykonawczego z płytkami wzmacniaczy wykorzystano gotowy element programu w postaci modelu źródła napięciowego o przebiegu trójkątnym i nastawianej amplitudzie sygnału [16].

Modelowanym przypadkiem działania systemu SSP-FK, w którym występuje falshywe jego zadziałanie, jest pojawienie się chwilowych spadków napięcia zasilania podczas występowania sygnału z czujnika DPS o wartości podprogowej (rys. 7).



Rys. 7. Schemat ideowy modelu komparatora sygnałów US1 w bloku wykonawczym [4]

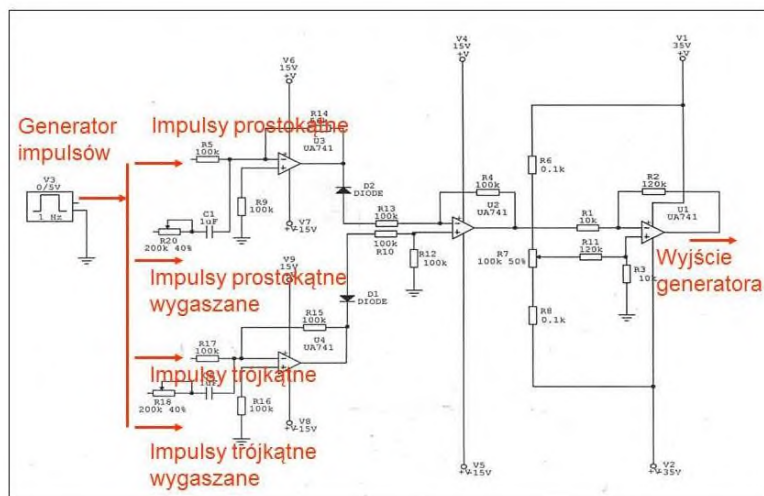
Działanie toru wejściowego płytki wzmacniaczy bloku SSP-FK-BI w takim stanie polega na tym, że sygnał na wejściu odwracającym wzmacniacza US1 pracującego w układzie komparatora (stanowiący napięcie odniesienia) zostaje przekroczony przez napięcie wejściowe z obwodu czujników DPS, podawane na wejście nieodwracające komparatora sygnałów wejściowych.

Napięcie na wyjściu komparatora US1 w warunkach występowania chwilowych spadków napięcia zasilania płytki wzmacniaczy i jednoczesnym występowaniu sygnału z czujnika pożaru DPS o wartości podprogowej można przedstawić w postaci [4]:

$$U_{US1}(s) = K_{ZAST} [K_{DPS} \cdot U_{DPS}(s) - G_{ZAST}(s) \cdot U_{ZASIL}(s)] \quad (1)$$

gdzie: U_{US1} – transformata Laplace’a napięcia na wyjściu sterującym komparatora US1 podczas trwania sygnału z czujnika pożaru DPS o wartości podprogowej;
 K_{ZAST} – zastępcze wzmocnienie komparatora US1;
 K_{DPS} – zastępcze wzmocnienie sygnału z czujnika pożaru DPS;
 U_{DPS} – transformata Laplace’a napięcia generowanego w czujniku pożaru DPS;
 G_{ZAST} – zastępcza transmitancja toru przetwarzania sygnałów od punktu zasilania płytki wzmacniaczy do wejścia komparatora US1;
 U_{ZASIL} – transformata Laplace’a napięcia zasilania płytki wzmacniaczy.

Znając właściwości pokładowego systemu elektroenergetycznego prądu stałego oraz wartości i przebieg napięcia zasilania na pokładzie śmigłowca Mi-8 [16] zbudowano w środowisku Circuit-Maker [4, 10] model symulacyjny generatora zakłóceń w zasilaniu elektrycznym (rys. 8). Model ten pozwala na generację impulsów o przebiegu prostokątnym i trójkątnym, normalnym i wygaszanym (charakteryzujących zakłócenia w sieci elektroenergetycznej śmigłowca Mi-8). Dodatkowo model umożliwia generację zakłóceń o przebiegu harmonicznym, dogodnych do badań właściwości dynamicznych modelowanego bloku wykonawczego SSP-FK-BI.



Rys. 8. Schemat ideowy modelu generatora zakłóceń w zasilaniu bloku wykonawczego [4]

4. Badania modelu systemu SSP-FK dla spadków napięcia

Celem badań symulacyjnych było określenie, jakie rodzaje zakłóceń napięcia zasilania i przy jakich sygnałach podprogowych z czujnika pożaru wywołują fałszywe zadziałanie systemu. Pozwala to na określenie, jakiego rodzaju stabilizatorów napięcia lub czujników pożaru należy użyć, aby zabezpieczyć system przed wpływem tych zakłóceń. Parametry zakłóceń występujących w sieci elektroenergetycznej na śmigłowcu Mi-8 zostały określone w badaniach eksperymentalnych, wykonanych w ramach ekspertyzy ITWL realizowanej na potrzeby Inspektoratu Wsparcia Sił Zbrojnych RP [16].

Podstawowym przypadkiem w modelowaniu działania systemu SSP-FK, w którym założono fałszywe jego zadziałanie, jest pojawienie się chwilowych spadków napięcia zasilania podczas występowania sygnału z czujnika pożaru o wartości podprogowej. Działanie toru wejściowego płytki wzmacniaczy bloku SSP-FK-BI w takim stanie polega na tym, że sygnał na wejściu odwracającym wzmacniacza US1 pracującego w układzie komparatora (stanowiący napięcie odniesienia) zostaje przekroczony przez napięcie wejściowe z obwodu czujników, podawane na wejście nieodwracające komparatora [12].

Warunkiem zadziałania układu sygnalizacji pożaru jest, aby sygnał z czujnika pożaru posiadał wartość chwilową większą niż sygnał odniesienia, zmniejszony w momencie występowania spadku napięcia zasilania. Warunek ten jest spełniony, gdy sygnał z czujnika pożaru będzie posiadał wartość podprogową tj. będzie większy od minimalnej wartości startowej, ale nie będzie przekraczał wartości uruchamiającej układ dla zasilania znamionowego. Sytuacja taka może wystąpić podczas chwilowego „owiania” czujników pożaru strumieniem powietrza z np. rozpraszaczy gazów wylotowych EWU lub podczas zmiany temperatury powietrza otaczającego śmigłowiec przy nagłej zmianie wysokości lotu.

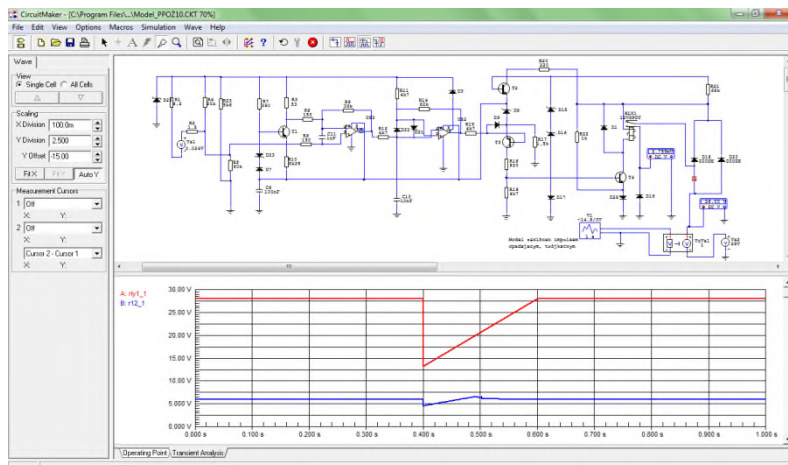
4.1. Modelowanie przebiegu napięcia na wyjściu komparatora sygnałów

Celem badania w zakresie modelowania przebiegu napięcia na wyjściu komparatora sygnałów US1 było określenie wartości sygnału z czujnika pożaru i parametrów chwilowych spadków napięcia zasilania pokładowego koniecznych do przejścia sygnału wyjściowego ze wzmacniacza sygnałów US2 do poziomu niskiego, powodującego otwarcie tranzystora mocy T3 i samoczynne zadziałanie płytki wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI [12].

Dla przypadku, gdy w badanym modelu symulacyjnym czujnik pożaru nie generował siły termoelektrycznej (brak pożaru), chwilowy spadek napięcia zasilania nie powodował wystąpienia fałszywego zadziałania systemu, niezależnie od kształtu i amplitudy impulsu zakłócenia pojawiającego się w zasilaniu pokładowym.

Dla przypadku symulacji nagłego wzrostu siły termoelektrycznej do wartości podprogowej 24 mV (np. przy chwilowym podgrzaniu czujnika pożaru w przedziale silników na skutek owiania go ciepłym powietrzem z rozpraszaczy gazów EWU),

następuje wzrost napięcia podawanego na wejście nieodwracające komparatora US1 płytki wzmacniaczy tego kanału (rys. 9), co powoduje wystąpienie fałszywego zadziałania bloku wykonawczego i jednocześnie systemu przeciwpożarowego SSP-FK.



Rys. 9. Przebieg napięcia na wyjściu komparatora sygnałów US1 (niebieski) [4]

Badania symulacyjne wykazały, że w chwili, gdy napięcie z obwodu czujnika pożaru, podawane na wejście sygnałowe nieodwracające komparatora US1, przekroczy napięcie odniesienia, następuje wzrost napięcia wyjściowego z komparatora US1 do poziomu wysokiego. Analiza otrzymanych przebiegów napięcia wykazała, że w normalnych warunkach zasilania 28,5 V napięcie wyjściowe z komparatora US1 w chwili jego zadziałania zmienia swoją wartość z poziomu niskiego 1,34 V do poziomu wysokiego 7,18 V, gdy z czujnika pożaru zostanie wygenerowana siła termoelektryczna o wartości 30 mV.

Wyniki badań potwierdziły założoną hipotezę, że w przypadku obniżenia napięcia z czujnika pożaru wywołanie zadziałania komparatora US1 wymaga obniżenia napięcia zasilania pokładowego. Dla przyjętej wartości siły termoelektrycznej wynoszącej 24 mV, występującej podczas nagłej zmiany napięcia zasilania pokładowego wywołanej włączeniem odbiornika dużej mocy, napięcie wyjściowe z komparatora zmienia swą wartość z poziomu niskiego 1,34 V do poziomu wysokiego 6,44 V, ale zadziałanie bloku wykonawczego występuje tylko dla napięcia zasilania będącego pomiędzy 14,60 V a 22,60 V.

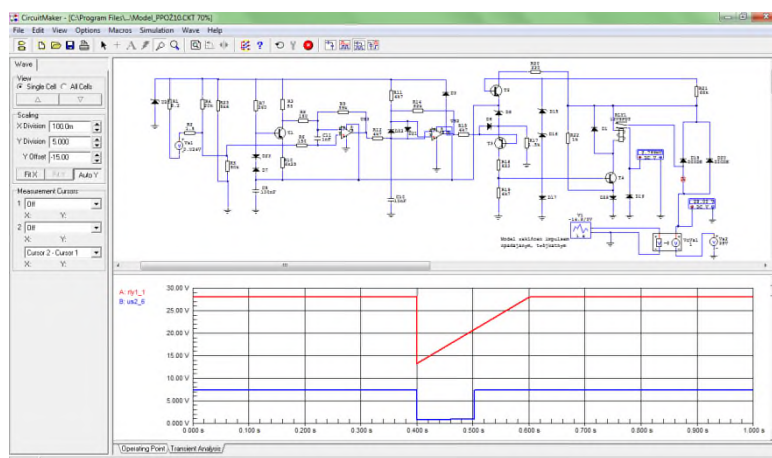
4.2. Modelowanie przebiegu napięcia na wyjściu wzmacniacza sygnalów

Celem badania w zakresie modelowania przebiegu napięcia na wyjściu wzmacniacza sygnalów US2 było określenie parametrów sygnalu z czujnika požaru oraz chwilowych spadków napięcia zasilania pokładowego koniecznych do przejścia sygnalu wyjściowego ze wzmacniacza sygnalów US2 do poziomu niskiego, powodującego otwarcie tranzystora mocy T3 i samoczynne zadziałanie płytki wzmacniacza bloku wykonawczego SSP-FK-BI i jednocześnie systemu przeciwpozarowego SSP-FK [12].

Dla przypadku, gdy w badanym modelu symulacyjnym czujnik požaru nie generował siły termoelektrycznej (brak požaru), chwilowy spadek napięcia zasilania nie powodował wystąpienia falshywego zadziałania systemu, niezależnie od kształtu i amplitudy impulsu zakłócenia pojawiającego się w zasilaniu pokładowym.

Dla przypadku symulacji nagłego wzrostu siły termoelektrycznej do wartości podprogowej 24 mV, następuje wzrost napięcia podawanego na wejście nieodwracające komparatora US1 płytki wzmacniacza tego kanału, co zmienia napięcie wyjściowe z komparatora US1, a dalej zmienia napięcie wyjściowe ze wzmacniacza sygnalów US2 (rys. 10) i powoduje wystąpienie falshywego zadziałania systemu.

Badania symulacyjne wykazały, że napięcie wyjściowe z komparatora US1 podane na wejście odwracające wzmacniacza sygnalów US2, będąc wyższym od napięcia odniesienia podawanego na wejście nieodwracające wzmacniacza, powoduje skok napięcia wyjściowego do poziomu niskiego. Analiza otrzymanych przebiegów napięcia wykazała, że w normalnych warunkach zasilania pokładowego 28,5 V wartość napięcia wyjściowego ze wzmacniacza sygnalów US2 w chwili jego zadziałania zmienia swoją wartość z poziomu wysokiego 7,32 V do poziomu niskiego 0,95 V, gdy z czujnika požaru zostanie wygenerowana siła termoelektryczna o wartości 30 mV.



Rys. 10. Przebieg napięcia na wyjściu wzmacniacza sygnalów US2 (niebieski) [4]

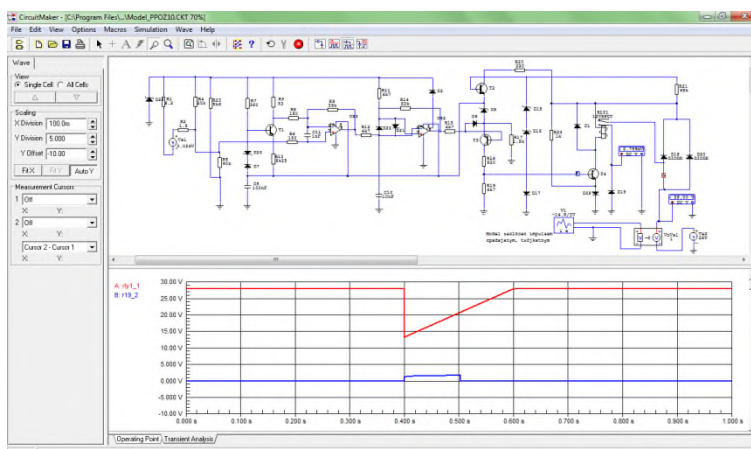
Podczas nagłej zmiany napięcia zasilania pokładowego i przy występowaniu siły termoelektrycznej z czujnika wynoszącej 24 mV, napięcie wyjściowe ze wzmacniacza sygnałów US2, podane poprzez rezystor R15 na bazę tranzystora mocy T3, zmienia swą wartość z poziomu wysokiego 7,32 V do poziomu niskiego 0,86 V, ale zadziałanie bloku wykonawczego występuje tylko dla napięcia zasilania będącego pomiędzy 14,60 V a 22,60 V. Badania symulacyjne wykazały, że zmiana napięcia wyjściowego ze wzmacniacza US2 ma przebieg prostokątny niezależnie od kształtu impulsu zakłócenieniowego występującego w obwodzie zasilania bloku wykonawczego SSP-FK-BI.

4.3. Modelowanie przebiegu napięcia na wejściu tranzystora mocy

Celem badania w zakresie modelowania przebiegu napięcia na wejściu tranzystora mocy T4 było określenie parametrów sygnału z czujnika pożaru oraz chwilowych spadków napięcia zasilania pokładowego koniecznych do otwarcia tranzystora T4, powodującego zamknięcie obwodu minusowego cewki przekaźnika wyjściowego RES-52 i samoczynne zadziałanie płytki wzmacniacza bloku wykonawczego SSP-FK-BI [12].

Dla przypadku, gdy w badanym modelu symulacyjnym czujnik pożaru nie generował siły termoelektrycznej (brak pożaru), chwilowy spadek napięcia zasilania nie powodował wystąpienia fałszywego zadziałania systemu, niezależnie od kształtu i amplitudy impulsu zakłócenia pojawiającego się w zasilaniu pokładowym.

Dla przypadku symulacji nagłego wzrostu siły termoelektrycznej do wartości podprogowej 24 mV, następuje skokowa zmiana napięcia wyjściowego ze wzmacniacza US2, a dalej po otwarciu tranzystora T3 następuje zmiana napięcia w obwodzie bazy tranzystora T4 (rys. 11), co powoduje wystąpienie fałszywego zadziałania systemu.



Rys. 11. Przebieg napięcia na bazie tranzystora T4 (niebieski) [4]

Badania symulacyjne wykazały, że niski poziom napięcia wyjściowego ze wzmacniacza US2 podany na bazę tranzystora mocy T3 powoduje jego otwarcie i wywołuje przepływ prądu w układzie kolektorowym tranzystora T3. W efekcie pojawia się spadek napięcia na rezystorze R19, które podane na bazę tranzystora T4 powoduje jego otwarcie. Analiza otrzymanych przebiegów napięcia wykazała, że w normalnych warunkach zasilania pokładowego 28,5 V wartość napięcia podawanego na bazę tranzystora T4 w chwili jego otwarcia zmienia swoją wartość z poziomu niskiego 0,00 V do poziomu wysokiego 1,62 V, gdy z czujnika pożaru zostanie wygenerowana siła termoelektryczna o wartości 30 mV.

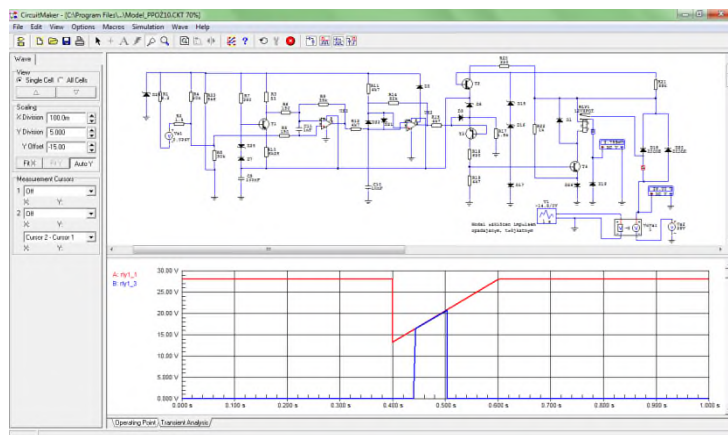
Przy obniżonym napięciu zasilania, podczas generacji siły termoelektrycznej o wartości 24 mV, napięcie podawane na bazę tranzystora T4 w chwili jego otwarcia zmienia swoją wartość z poziomu niskiego 0,00 V do poziomu wysokiego 1,56 V, ale zadziałanie bloku wykonawczego występuje tylko dla napięcia zasilania będącego pomiędzy 14,60 V a 22,60 V.

4.4. Modelowanie przebiegu napięcia na wyjściu przekaźnika RES-52

Celem badania w zakresie modelowania przebiegu napięcia na wyjściu przekaźnika wykonawczego RES-52 zabudowanego na płycie wzmacniaczy było określenie parametrów sygnału z czujnika pożaru oraz chwilowych spadków napięcia zasilania pokładowego koniecznych do zamknięcia obwodu minusowego cewki przekaźnika wyjściowego RES-52 i samoczynne zadziałanie płytki wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI [12].

Dla przypadku, gdy w badanym modelu symulacyjnym czujnik pożaru nie generował siły termoelektrycznej (brak pożaru), chwilowy spadek napięcia zasilania nie powodował wystąpienia fałszywego zadziałania systemu, niezależnie od kształtu i amplitudy impulsu zakłócenia pojawiającego się w zasilaniu pokładowym.

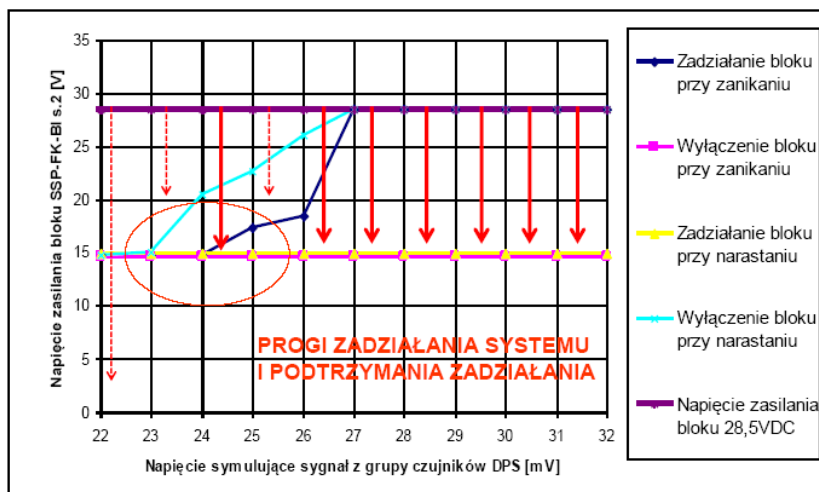
Dla przypadku symulacji nagłego wzrostu siły termoelektrycznej z czujnika do wartości podprogowej 24 mV, następuje wzrost napięcia podawanego na bazę tranzystora T4, a dalej zamknięcie obwodu minusowego cewki przekaźnika wyjściowego RES-52, co powoduje w nim przepływ prądu i zamknięcie zestyków dla obwodu sygnalizacji pożaru (rys. 12), a w efekcie wystąpienie fałszywego zadziałania systemu.



Rys. 12. Przebieg napięcia na wyjściu przekaźnika RES-52 (niebieski) [4]

Badania symulacyjne wykazały, że zadziałanie tranzystora T4 powoduje zamknięcie przez diodę D28 obwodu minusowego przekaźnika wyjściowego RES-52, który pod wpływem podanego napięcia zasilania powoduje zamknięcie obwodu i generację sygnału pożaru. Zadziałanie przekaźnika RES-52 powoduje podanie napięcia zasilania na końcówkę 2 płytki wzmacniaczy wybranego kanału bloku wykonawczego SSP-FK-BI, z którego otrzymywany jest sygnał o pożarze w nadzorowanym przedziale. Sygnał ten podawany jest dalej do obwodów wykonawczych, uruchamiających układ sygnalizacji i gaszenia pożaru. Analiza otrzymanych przebiegów napięcia wykazała, że w normalnych warunkach zasilania pokładowego 28,5 V, gdy siła termoelektryczna wyniesie 30 mV, wartość napięcia na kolektorze tranzystora T4 zmienia się z poziomu wysokiego 27,80 V do poziomu niskiego 1,20 V, co powoduje przepływ prądu przez cewkę przekaźnika RES-52 i zamknięcie jego zestyków. Przy obniżonym napięciu zasilania, podczas generacji siły termoelektrycznej z czujnika o wartości 24 mV, napięcie w obwodzie minusowym cewki przekaźnika RES-52 podczas jego włączenia osiąga wartości w przedziale od 1,20 V do 1,18 V, ale zadziałanie bloku występuje tylko dla napięcia zasilania będącego pomiędzy 14,60 V a 22,60 V.

W celu określenia napięcia zasilania bloku wykonawczego podczas jego zadziałania w zależności od wartości siły termoelektrycznej generowanej z czujnika pożaru, wykonano badania symulacyjne dla zasilania o przebiegu harmonicznym 0,1 Hz i amplitudzie 32 V. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów w zakresie wartości sygnału z czujnika pożaru wymaganego do zadziałania bloku wykonawczego SSP-FK-BI przy spadku napięcia w jego obwodzie zasilania, zbudowano zbiorczy wykres (rys. 13), przedstawiający obszar zadziałania bloku oraz obszar podtrzymania jego zadziałania, przy znamionowym napięciu zasilania 28,5 V.



Rys. 13. Charakterystyka zadziałania i podtrzymania zadziałania systemu SSP-FK [4]

5. Wyniki badań eksperymentalnych systemu SSP-FK

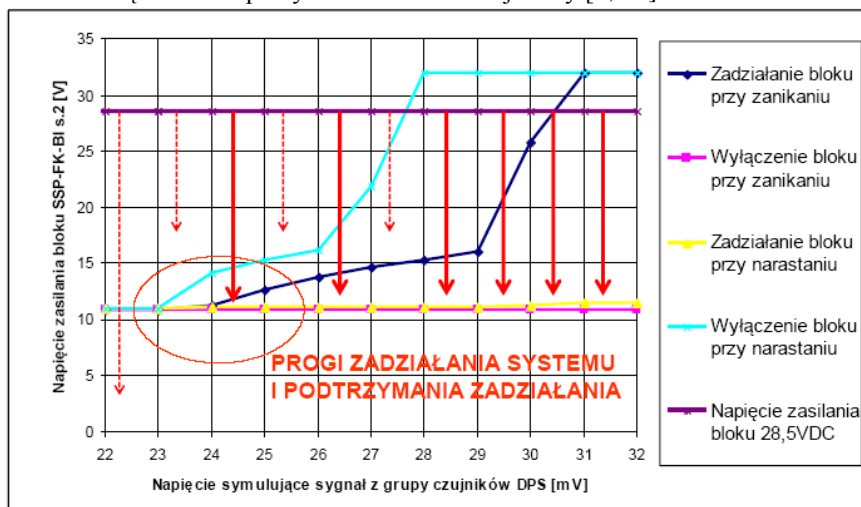
Badania wpływu impulsów zanikowych w obwodach zasilania na możliwość fałszywego zadziałania systemu SSP-FK przeprowadzono dla bloku wykonawczego SSP-FK-BI „suchego” oraz „mokrego”, poddanego oddziaływaniu wilgoci (wody). Założono, że pod wpływem wilgoci zmiany mogą ulec wartości parametrów torów pomiarowych tworzonych przez elementy elektroniczne występujące na płycie wzmacniaczy bloku wykonawczego (m.in. wartości parametrów kondensatorów, tranzystorów i układów scalonych). Badania weryfikacyjne rozpoczęto od oszacowania maksymalnych wartości sygnału podprogowego z czujników pożaru stosowanych na śmigłowcu Mi-8 [4, 16].

Badania wrażliwości bloku wykonawczego SSP-FK-BI na chwilowe spadki napięcia zasilania w warunkach występowania sygnału podprogowego z czujników pożaru wykonano na specjalizowanym stanowisku pomiarowym w WZL-1 Łódź. Stanowisko to (rys. 14) umożliwiło jednocześnie ustawienie napięcia charakteryzującego siłę termoelektryczną stanowiącą sygnał z czujników pożaru w dozorowanym przedziale oraz chwilowe spadki napięcia zasilania pokładowego modelowane z generatora sygnału harmonicznego [4, 14, 16].



Rys. 14. Stanowisko do badań systemu w warunkach spadku napięcia zasilania [4]

Określona w badaniach charakterystyka (rys. 15) pozwala na potwierdzenie możliwości i określenie warunków samoczynnego zadziałania systemu SSP-FK w czasie wykonywania „zimnego” lub „gorącego” rozruchu silnika śmigłowca Mi-8, a także w momencie włączenia do pracy odbiorników dużej mocy [4, 16].



Rys. 15. Charakterystyka zadziałania i podtrzymania zadziałania systemu SSP-FK [4]

Wykres ten pokazuje, że uruchomienie bloku wykonawczego może nastąpić dla sygnałów z czujników pożaru mniejszych niż wartości podawane przez producenta dla znamionowego napięcia zasilania (28÷32 mV). Pozwala też zrozumieć, dlaczego nie każdy spadek napięcia w zasilaniu elektrycznym wywołuje zadziałanie bloku.

Dla wywołania fałszywego zadziałania bloku spadek napięcia musi posiadać wartości mieszczące się w obszarze zadziałania, a po przejściu w obszar podtrzymania zadziałania musi on trwać wystarczająco długo, aż nastąpi przełączenie układów samopodtrzymania zasilania bloku. Obszar podtrzymania zadziałania umożliwia uruchomienie bloku dla czasów spadku napięcia zasilania krótszych niż wymagane w obszarze zadziałania [4, 16].

Otrzymane wyniki wykazały, że istnienie obszaru podtrzymania zadziałania bloku wykonawczego występuje jako rozszerzenie obszaru uruchomienia zadziałania i rozpoczyna się dla sygnałów z czujników pożaru o wartości ok. 23 mV.

Parametrem determinującym wystąpienie fałszywego zadziałania bloku wykonawczego jest też czas trwania spadku napięcia zasilania. Badania wykazały, że im mniejsze jest napięcie zasilania podczas spadku, tym wymagany jest dłuższy czas trwania spadku napięcia zasilania [4, 14, 16].

Otrzymane wyniki badań mogą być istotne przy analizach dotychczasowych rozwiązań konstrukcyjnych m.in. [5, 11] oraz projektowaniu nowych systemów zasilania elektroenergetycznego [6, 8, 17, 18].

6. Podsumowanie

Badania eksperymentalne systemu przeciwpożarowego SSP-FK potwierdziły większość wyników badań numerycznych opracowanych modeli symulacyjnych sposobu przetwarzania sygnałów w systemie SSP-FK. Nieznaczne różnice w otrzymanych wartościach parametrów jego fałszywego zadziałania wynikają z ograniczeń modelowania w pakiecie Circuit-Maker.

Badania laboratoryjne wykonane w Zakładzie Awioniki ITWL umożliwiły doprecyzowanie warunków powstawania oraz parametrów sygnału napięciowego otrzymywanego z termoelektrycznych czujników pożaru DPS i DTBG dla czynników temperaturowych wywołujących fałszywe zadziałanie systemu SSP-FK (m.in. kształt, wartość maksymalna i czas trwania sygnału pożaru). Wykazały one, że w warunkach normalnych zasilania pokładowego 28,5 V fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego SSP-FK-BI wywołuje sygnał napięciowy na wejściu tranzystora mocy T4 o napięciu nie niższym niż 1,5 V i czasie trwania nie krótszym niż 10 ms. W badaniach tych stwierdzono, że taki sygnał może powstać podczas chwilowych spadków napięcia zasilania do poziomu 12 V i sile termoelektrycznej generowanej z czujników pożaru o wartości podprogowej 24 mV.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników pomiaru rzeczywistej temperatury powietrza w przedziale pieca grzewczego KO-50 na śmigłowcu Mi-8 stwierdzono,

że w warunkach zimowych lub w czasie lotu z przewyższeniem, powiew zimnego powietrza w przedziale pracującego pieca grzewczego KO-50 powodujący chwilowe oziębienie spoin odkrytych w czujnikach pożaru DPS, może być przyczyną wygenerowania siły termoelektrycznej o wartości chwilowej nawet do 24 mV. Wartość ta w warunkach wystąpienia chwilowych spadków napięcia zasilania (wywołanych włączeniem odbiorników dużej mocy na pokładzie śmigłowca Mi-8, np. wentylatora pieca grzewczego) może być wystarczająca do uruchomienia tranzystora T4 na płycie wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI w przypadku zastosowania komparatora sygnałów US1 o dużej histerezie.

W badaniach eksperymentalnych wykonanych na śmigłowcu Mi-8 w JW Dęblin wykazano, że zadziałanie przekaźnika RES-52 w bloku wykonawczym SSP-FK-BI i pojawienie się sygnału pożaru może być wywołane przez chwilowe impulsy zakłócające, występujące w obwodach zasilania płytki wzmacniaczy przy włączaniu / wyłączeniu odbiorników dużej mocy. Potwierdzono, że przyczyną fałszywego zadziałania może być oddziaływanie chwilowego spadku napięcia (przy sygnale podprogowym z czujnika pożaru) oraz chwilowych przepięć (przy wpływie wilgoci na obwody sterowania tranzystorem T4).

Ważnym zadaniem było opracowanie metod badań profilaktycznych i rozwiązań korygujących, które w postaci biuletynów eksploatacyjnych zostały wdrożone do stosowania w JW i WZL-1 S.A.

7. Literatura

1. Drozdowski Z., Macander M.: Działalność instytucji Inspektora i Inspektoratu MON ds. Bezpieczeństwa Lotów. Wypadki ciężkie w latach 1972-2012, Warszawa 2021.
2. Festag S.: False Alarm Ratio of Fire Detection and Fire Alarm Systems in Germany - A Meta Analysis, Fire Saf. J., 79, 119-126, 2016.
3. Fijolek R.: Collaboration in CircuitMaker extends to real time concurrency editing, CircuitMaker, Blog Altium, 2016
4. Głyda K.: Badanie właściwości lotniczego systemu przeciwpożarowego, rozprawa doktorska, BT ITWL, Warszawa 2022.
5. Instrukcja MON/DWL: Śmigłowiec Mi-8. Opis osprzętu, Poznań 1971.
6. Jia Y., Rajashekara K.: Induction Machine for More Electric Aircraft: Enabling New Electrical Power System Architectures, IEEE Electrification Magazine, vol. 5, 2017.
7. Lipsman R. L., Rosenberg J. M.: Multivariable Calculus with MATLAB® With Applications to Geometry and Physics, Springer 2017.
8. Madonna V., Giangrande P., Galea M.: Electrical Power Generation in Aircraft: review, challenges and opportunities, IEEE, DOI: 10.1109/TTE.2018.2834142, 2018.
9. Materiały analityczne ITWL: Zestawienie przypadków fałszywego zadziałania instalacji przeciwpożarowej SSP-FK, System Informatyczny SI SAMANTA, 2021.

10. Materiały opisowe Altium Limited: CIRCUITMAKER SIMULATOR. Przewodnik po programie, Open Source Hardware, www.altium.com, 2019.
11. Materiały PZL-Mielec S.A.: Samolot M-28B „Bryza”. Opis techniczny samolotu. Część 2. Osprzęt/Uzbrojenie, Mielec 2001.
12. Michalak S., Szelmanowski A., Skoczylas D.: Badanie przyczyn fałszywego zadziaływania instalacji przeciwpożarowych, BT ITWL, Warszawa 1993.
13. Mrozek B., Mrozek Z.: MATLAB i Simulink. Poradnik użytkownika, Wyd. Helion, ISBN 83-7361-486-9, Gliwice 2004.
14. Norma Obronna MON: Wojskowe statki powietrzne. Pokładowe układy zasilania elektrycznego. Podstawowe parametry, wymagania i badania, NO-15-A200:2007.
15. Sajda K., Borowski J., Szelmanowski A., Pietnoczko B., Gajewski T., Sekuła A.: Badania przyczyn nieprawidłowego działania bloków wzmacniaczy instalacji przeciwpożarowej SSP-FK-BI, BT ITWL, Warszawa 2010.
16. Szelmanowski A., Tokarski T., Gajewski T., Głyda K., Kalisiak M., Sekuła A.: Badania możliwości samoczynnego zadziałania instalacji przeciwpożarowej SSP-FK śmigłowca Mi-8 przy zaniku/spadku napięcia zasilania, BT ITWL, Warszawa 2015.
17. Tooley M.H., Wyatt D.: Aircraft Electrical and Electronic Systems: Principles, Operation and Maintenance, ISBN 978-0-7506-8695-2, Routledge: London 2011.
18. Zhao X., Guerrero J.M., Wu Xiaohao X.: Review of Aircraft Electric Power Systems and Architectures, IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 2014.

