

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

ZADZIAŁANIA LOTNICZEGO POKŁADOWEGO SYSTEMU PRZECIWOŻAROWEGO WYWOŁANE ZWARCIAMI W BŁOKACH STEROWANIA

Actions of the aviation on-board fire protection system caused by short circuits in control blocks

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 z wykorzystaniem 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 dla przypadku zwarć elektrycznych powstających w jego obwodach sterowania (w szczególności w płytkach drukowanych). 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, modelowanie działania

Abstract: The article presents the results of simulation tests of the SSP-FK aviation fire protection system and identification of the main reasons of its false operation on many aeroplanes and helicopters of the Polish Armed Forces using 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 signalling are discussed. Selected test results of the developed simulation model of the actuator block under electrical short-circuit conditions in its control circuits (particularly on printed circuit boards) are presented. The effectiveness of the proposed test method with 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 suppression fire system, diagnostic simulator, operation modeling

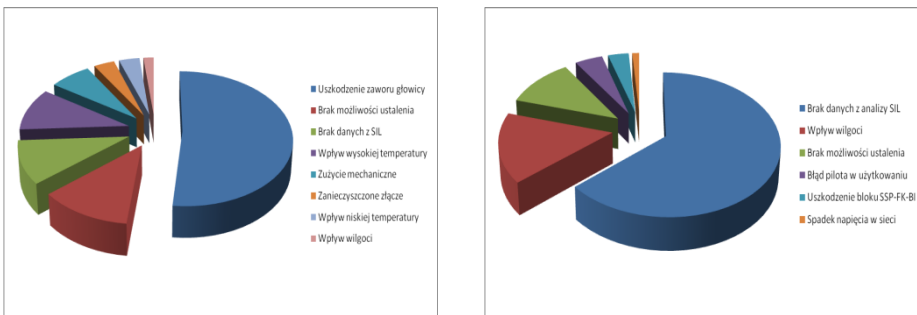
1. Wstęp

Jednym z poważnych zagrożeń na pokładzie statku powietrznego są zwarcia obwodów elektrycznych, zarówno obwodów w sieci zasilania elektroenergetycznego (wywołujących najczęściej zadziałanie układów zabezpieczających), jak i obwodów sterowania (nie mających zabezpieczeń i ulegających uszkodzeniom) [4, 18]. Szczególnie niebezpieczne są zwarcia powodujące nieprawidłowe zadziałanie lub chwilowy brak poprawnego działania elementów systemu awionicznego, ale nie powodujące trwałego ich uszkodzenia, co utrudnia diagnostykę i określenie przyczyn niesprawności [3, 5, 6, 8].

Przykładem takich zdarzeń są zwarcia występujące w obwodach elektrycznych płytek drukowanych stanowiących elementy bloków wykonawczych lotniczego systemu przeciwpożarowego SSP-FK. System ten jest 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 [13].

Genezą podjętych w ITWL badań lotniczych systemów przeciwpożarowych w aspekcie wpływu zwarć elektrycznych były przypadki ich fałszywego zadziałania [8]. Zdarzenia te bezpośrednio zagrażały bezpieczeństwu lotu, zmuszając załogę do bezzwłocznego lądowania w terenie przygodnym. Szczególne zagrożenie występowało w czasie realizacji misji wojskowych w PKW Irak i Afganistan, gdzie przygodne lądowanie wiązało się z możliwością wykrycia i ostrzału śmigłowca przez nieprzyjaciela.

Analizy statystyczne wykonane w ITWL wykazały, że w systemach informatycznych gromadzących informacje o niesprawnościach statków powietrznych w Siłach Zbrojnych RP, odnotowane są liczne przypadki fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK włącznie z uruchomieniem butli gaśniczych. Do oceny statystycznej przypadków fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK wykorzystano dane zawarte w systemie informatycznym SI SAMANTA [8, 15]. Na uwagę w analizie przyczyn niesprawności tego systemu (rys. 1) zasługuje wpływ wilgoci (ok. 16%) mogący powodować zwarcia obwodów elektrycznych, który stanowił jedną z głównych hipotez weryfikowanych w badaniach wykonywanych w ITWL [8, 15-17].

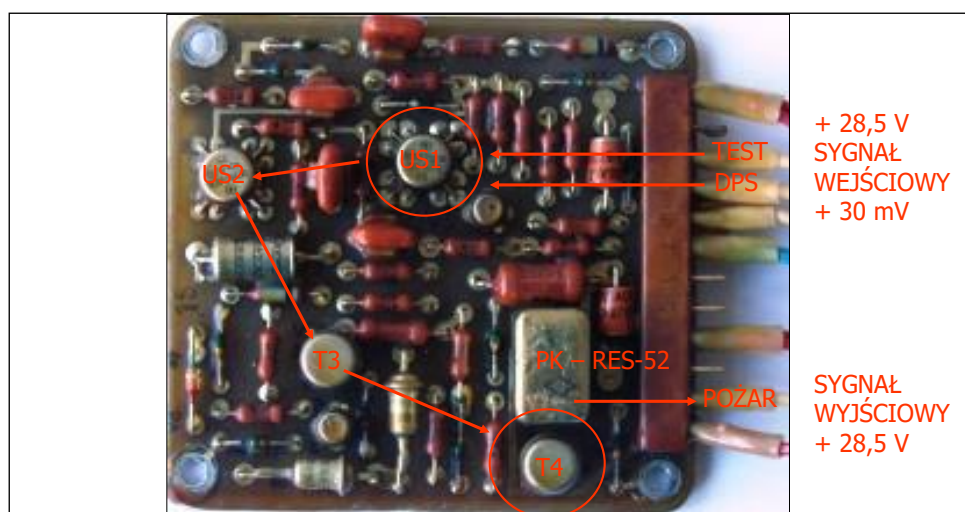


Rys. 1. Udział statystyczny przyczyn niesprawności systemu SSP-FK w zakresie uszkodzeń urządzeń mechanicznych (po lewej) i urządzeń elektrycznych (po prawej) [8]

2. Analiza budowy i funkcjonowania systemu SSP-FK w normalnych warunkach zasilania elektrycznego

W celu przygotowania danych do modelowania działania systemu SSP-FK wykonano analizę budowy i funkcjonowania jego poszczególnych elementów. Ustalono, że najbardziej newralgicznym elementem w aspekcie jego fałszywego zadziałania jest blok wykonawczy SSP-FK-BI, zawierający 6 drukowanych płytek wzmacniaczy [8].

Do identyfikacji struktury płytek wzmacniaczy bloków wykonawczych SSP-FK-BI (rys. 2) i parametrów ich elementów składowych wykorzystano metodę bezpośrednią, polegającą na demontażu elementu i odczycie wartości jego parametrów elektrycznych. Wartości te posłużyły jako dane wejściowe do modelowania działania bloku wykonawczego SSP-FK-BI i badania jego właściwości podczas występowania zakłóceń w zasilaniu elektrycznym w postaci chwilowych przepięć i zaników napięcia zasilania oraz zwarcie wybranych obwodów elektrycznych na płytce wzmacniaczy [1, 8, 14-17].



Rys. 2. Widok elementów elektronicznych zabudowanych na płytce wzmacniaczy [8]

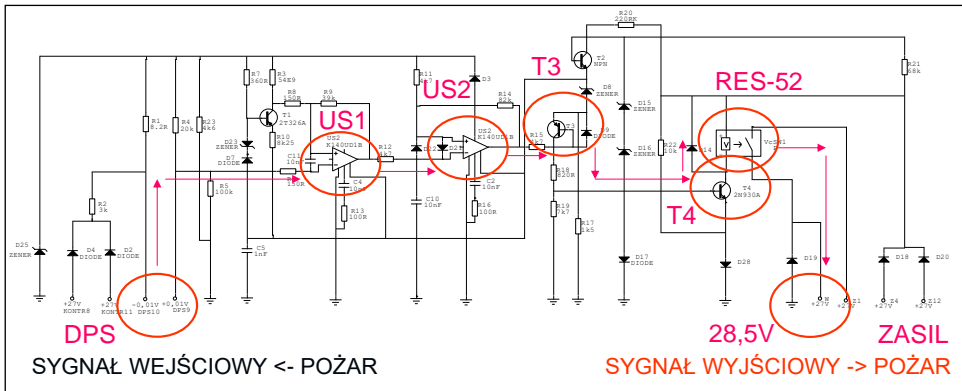
Do tego celu niezbędna była identyfikacja połączeń montażowych i odtworzenie schematu elektrycznego płytki wzmacniaczy, określającego wzajemne umiejscowienie wszystkich elementów elektronicznych oraz umożliwiającego zdefiniowanie głównych funkcji pełnionych przez poszczególne obwody elektryczne na płytce wzmacniaczy w analizowanym bloku wykonawczym SSP-FK-BI [8, 15-17].

Wyniki analizy budowy i funkcjonowania płytki wzmacniaczy pozwoliły na odtworzenie schematu elektrycznego (wraz z identyfikacją wartości elementów elektronicznych) oraz opracowanie jego odpowiednika numerycznego w pakiecie obliczeniowym Circuit-Maker (umożliwiającym projektowanie i testowanie obwodów

elektrycznych, w tym obrazowanie przebiegu napięć i prądów w stanach dynamicznych). Do weryfikacji modelu wykorzystane zostały wyniki badań wykonanych w ITWL, otrzymane w ramach realizowanych ekspertyz dla Komisji Badania Wypadków Lotniczych oraz Inspektoratu Wsparcia Sił Zbrojnych RP [15-17].

Na podstawie przeprowadzonej identyfikacji elementów składowych i struktury ich połączeń wyróżniono cztery moduły funkcjonalne, występujące na płycie wzmacniaczy: moduł zasilania (oparty na tranzystorach mocy T1 i T2), moduł sygnałów wejściowych (przetwarzanie sygnału z czujników DPS lub sygnału kontroli), moduł porównania i wzmocnienia sygnałów (wykorzystujący komparator US1 i wzmacniacz US2) oraz moduł generacji sygnału wyjściowego (tranzystory T3 i T4 oraz przekaźnik wykonawczy RES-52 zabudowany na płycie wzmacniaczy bloku wykonawczego).

Wyróżnione moduły funkcjonalne zamodelowano w pakiecie Circuit-Maker (rys. 3) przy wykorzystaniu elementów ze standardowych bibliotek (modeli numerycznych: układów scalonych, diod, tranzystorów, rezystorów i kondensatorów i przekaźnika wyjściowego), dla których zdefiniowano wartości parametrów elektrycznych określonych w procesie identyfikacji elementów składowych i struktury połączeń na płycie wzmacniaczy w bloku wykonawczym SSP-FK-BI [2, 7, 8, 10].



Rys. 3. Schemat ideowy płytki wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI [8]

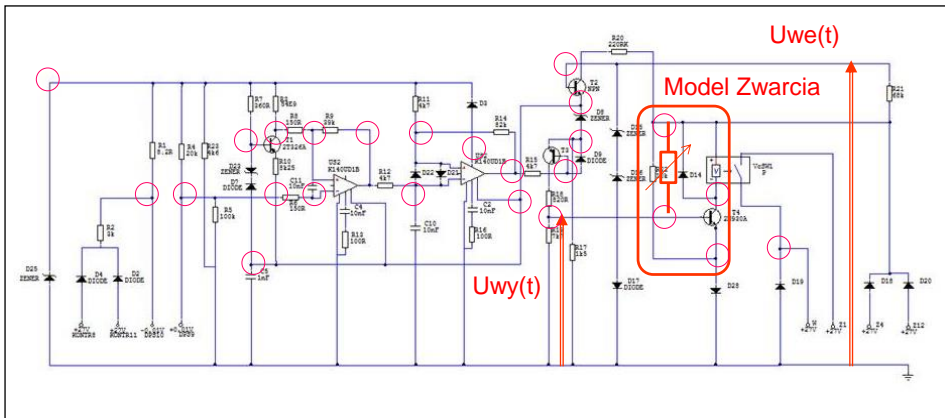
Do badań symulacyjnych zostały wybrane dwa obszary oddziaływania sygnałów zakłócających na obwody elektryczne płytki wzmacniaczy: kanał porównywania sygnałów wejściowych komparatora US1 oraz kanał sterowania bazą tranzystora T4 [8].

Wykonana analiza funkcjonalna płytki wzmacniaczy wykazała, że w warunkach normalnych (bez zakłóceń w zasilaniu elektrycznym) zadziałanie układu jest wywołane ogrzaniem czujnika DPS lub podaniem sygnału KONTROLA. Sygnał pożaru podany na wejście komparatora US1 powoduje pojawienie się dodatniego napięcia na bazie tranzystora T4, co z kolei uruchamia przekaźnik wyjściowy RES-52 na płycie wzmacniaczy [8, 17].

3. Możliwości modelowania stanów fałszywego zadziałania systemu SSP-FK w warunkach zwarcń elektrycznych

Przypadkiem szczególnym w modelowaniu działania systemu SSP-FK, w którym zachodzi fałszywe jego zadziałanie, jest występowanie spowodowanych wilgocią lokalnych zwarcń pomiędzy wybranymi obwodami elektrycznymi na płycie wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI, nie powodujących trwałego uszkodzenia jego elementów elektronicznych. Badanie fałszywego zadziałania systemu w stanie zwarcia ograniczono do napięcia znamionowego 28,5 V lub jego przepięć zgodnie z [11, 12].

W stanie wystąpienia lokalnego zwarcia (rys. 4), działanie toru podania napięcia zasilania do płytki wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI do obwodu sterowania tranzystora T4 pracującego w układzie bramki (uruchamiającego przełącznik RES-52 zamykający końcowy obwód sygnalizacji pożaru) polega na tym, że sygnał na jego bazie jest wynikiem transmisji zasilania przez zmniejszoną na skutek wilgoci rezystancję izolacji oraz elementy elektroniczne (rezystancyjne i pojemnościowe) występujące w obwodzie zwarcia [8, 17].



Rys. 4. Schemat ideowy modelu zwarcia wybranych obwodów elektrycznych w bloku wykonawczym SSP-FK-BI [8]

Napięcie na bazie tranzystora T4 w warunkach występowania chwilowych zakłóceń napięcia zasilania płytki wzmacniaczy dla wybranych punktów obwodu zwarcia można przedstawić w postaci podanej w [15]:

$$U_{BT4}(s) = K_{ZAST} \cdot \frac{1}{\tau_{ZAST} \cdot s + 1} \cdot \frac{R_{ZAST}}{R_{ZAST} + R_{ZWARCIA}} \cdot U_{ZASIL}(s) \quad (1)$$

gdzie: U_{BT4} – transformata Laplace’a napięcia generowanego na bazie tranzystora T4, powodującego fałszywe zadziałanie systemu;
 K_{ZAST} – zastępcze wzmocnienie toru transmisji sygnału zakłócenia dla wybranych punktów zwarcia;
 τ_{ZAST} – stała czasowa członu inercyjnego charakteryzującego właściwości w obwodzie zawierającym rezystancje i pojemności;
 R_{ZAST} – rezystancja zastępcza w obwodzie zawierającym rezystancje;
 $R_{ZWARCIA}$ – rezystancja izolacji stanowiąca drogę dla prądu zwarcia dla wybranych punktów;
 U_{ZASIL} – transformata Laplace’a napięcia zasilania zawierającego chwilowe zakłócenia w obwodzie zasilania płytki wzmacniaczy.

W stanie ustalonym zależność powyższą można przedstawić w postaci uproszczonej, podanej w [15], dogodnej do wykonywania rzeczywistych pomiarów weryfikujących wyniki symulacji:

$$U_{BT4} = K_{ZAST} \cdot \frac{R_{ZAST}}{R_{ZAST} + R_{ZWARCIA}} \cdot U_{ZASIL} \quad (2)$$

Warunkiem fałszywego zadziałania układu sygnalizacji pożaru jest, aby sygnał na bazie tranzystora T4 posiadał odpowiednią wartość chwilową. Warunek ten dla impulsu prostokątnego jest spełniony podobnie jak w przypadku zakłóceń przepięciowych, natomiast dla zakłóceń o innym kształcie określenie ich parametrów wywołujących zadziałanie układu sygnalizacji pożaru wymaga wykonania odpowiednich badań teoretycznych i eksperymentalnych [8, 17].

Zgodnie z przyjętymi we wstępie założeniami, celem badań symulacyjnych jest określenie, jakiego rodzaju zwarcia (tj. o jakiej rezystancji izolacji i pomiędzy jakimi punktami obwodów elektrycznych płytki wzmacniaczy) wywołują fałszywe zadziałanie systemu, oraz jakiego rodzaju rozwiązań konstrukcyjnych (w zakresie rozmieszczenia ścieżek drukowanych lub zastosowania powłok lakierniczych) należy użyć, aby zabezpieczyć płytkę przed powstaniem tych zwarc [8, 17].

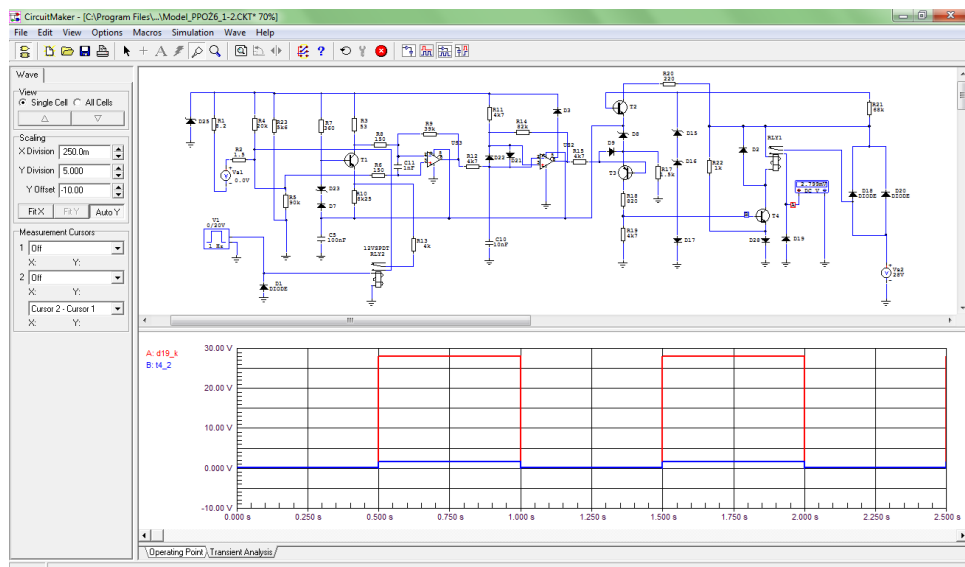
Podczas wykonywania badań symulacyjnych w aspekcie skutków zwarcia obwodów elektrycznych z wykorzystaniem opracowanego modelu należy wziąć pod uwagę, że nie dla wszystkich przypadków powstawania lokalnych zwarc na płycie wzmacniaczy występuje fałszywe zadziałanie systemu SSP_FK [2, 8, 15-17]. Część z tych zwarc może powodować tylko zmianę wartości natężenia prądów i potencjałów elektrycznych (bez wystąpienia fałszywej sygnalizacji pożaru), a część może powodować trwałe uszkodzenie elementów elektronicznych. Dlatego przy ocenie skutków zwarcia należy dodatkowo określić moc wydzielaną na badanym elemencie elektronicznym i porównać z jego wartością normatywną (stanowiącą zabezpieczenie przed trwałym uszkodzeniem elementu na skutek przegrzania).

4. Wyniki badań modelu systemu SSP-FK dla zwarć wybranych obwodów elektrycznych płytki wzmacniaczy

Na podstawie wykonanych badań modelu symulacyjnego działania systemu przeciwpożarowego SSP-FK przedstawiono punkty połączenia i wartości maksymalnej rezystancji (rezystor R13) dla zwarć wybranych obwodów elektrycznych na płycie wzmacniaczy, powodujących fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego SSP-FK-BI [8].

4.1. Modelowanie zwarć do obwodów tranzystorów T1 i T2

Badania wpływu zwarć na fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego rozpoczęto od modelowania zwarć pomiędzy wybranymi punktami płytki wzmacniacza a obwodami stabilizowanego napięcia zasilania zbudowanymi na tranzystorach T1 i T2 (rys. 5).



Rys. 5. Model symulacyjny wpływu rezystancji izolacji wybranych obwodów elektrycznych z tranzystorami T1 i T2 na fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego [8]

Sprawdzenie odległości rozmieszczenia punktów zwarcia na płycie wzmacniaczy pozwoliło wybrać 3 przypadki fałszywego zadziałania systemu (tabela 1 – kolor żółty):

1. Zwarcie (01) w obwodach zasilania polegające na połączeniu obwodu wejścia WE9 do emitera ET1 tranzystora T1, stanowiącego stabilizowane źródło napięcia odniesienia dla komparatora sygnałów US1 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 4,5 k Ω).

2. Zwarcie (02) w obwodach zasilania polegające na połączeniu obwodu wejścia WE9 do bazy BT1 tranzystora T1, stanowiącego stabilizowane źródło napięcia odniesienia dla komparatora sygnałów US1 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 390 Ω).
3. Zwarcie (03) w obwodach zasilania polegające na połączeniu obwodu masy płytki do kolektora CT1 tranzystora T1, stanowiącego stabilizowane źródło napięcia odniesienia dla wzmacniacza US1 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 12 k Ω).

Tabela 1

Wartości maksymalne rezystancji zwarcia dla wybranych obwodów zasilania powodujące fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego SSP-FK-BI

Zwarcia	BT1	CT1	ET1	BT2	CT2	ET2	7US1	7US2
MASA	X	12 k Ω	X	X	X	X	X	X
ZASIL	X	X	X	X	X	X	X	X
BT1	X	X	X	80 k Ω	X	7 k Ω	X	X
CT1	X	X	X	X	X	X	X	X
ET1	X	X	X	X	X	X	X	X
BT2	80 k Ω	X	X	X	X	X	X	X
CT2	X	X	X	X	X	X	X	X
ET2	7 k Ω	X	X	X	X	X	X	X
7US1	X	X	X	X	X	X	X	X
7US2	X	X	X	X	X	X	X	X
WE9	390 Ω	X	4,5 k Ω	X	X	X	X	X
WE10	32 k Ω	4 k Ω	360 k Ω	X	X	360 k Ω	X	X
9US1	665 k Ω	650 Ω	1 M Ω	X	X	3 M Ω	X	X
10US1	X	X	X	X	X	X	X	X
5US1	98 k Ω	35 k Ω	345 k Ω	X	X	345 k Ω	X	X
9US2	98 k Ω	X	480 k Ω	X	X	480 k Ω	X	X
10US2	X	19 k Ω	213 k Ω	X	X	X	X	X
5US2	X	X	1 k Ω	X	X	X	X	X
12US1	X	X	X	X	X	X	X	X
12US2	X	X	X	X	X	X	X	X
BT3	X	X	606 k Ω	X	X	X	X	X
CT3	14 k Ω	225 k Ω	500 k Ω	X	X	14 k Ω	X	X
ET3	X	200 k Ω	505 k Ω	X	X	310 Ω	X	X
BT4	14 k Ω	805 k Ω	1 M Ω	X	X	25 k Ω	X	X
CT4	170 Ω	29 k Ω	785 k Ω	180 k Ω	X	915 Ω	X	X
ET4	X	845 Ω	1 M Ω	X	X	X	X	X

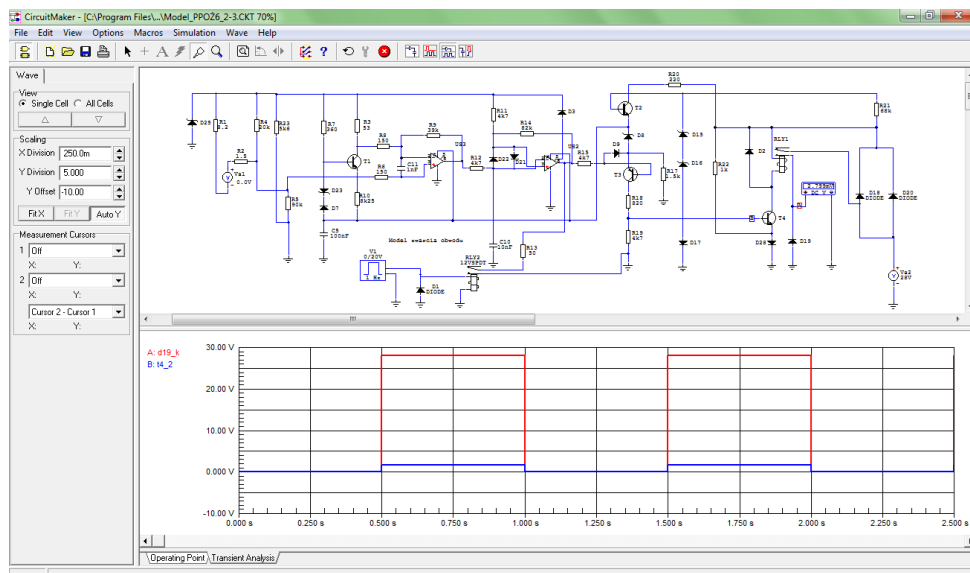
Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 5) wykazały, że zwarcie (01) w obwodach zasilania, polegające na połączeniu obwodu wejścia WE9 do emitera ET1 tranzystora T1, powoduje podanie z emitera ET1 napięcia o wartości 8,68 V (wyższej niż obecne na wejściu WE9 napięcie 6,71 V) na wejście nieodwracające 10US1. Powoduje to zmianę sygnału wyjściowego z komparatora US1 z poziomu niskiego 1,34 V na wysoki 6,53 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 5) wykazały, że zwarcie (02) w obwodach zasilania, polegające na połączeniu obwodu wejścia WE9 do bazy BT1 tranzystora T1, powoduje podanie z bazy BT1 napięcia o wartości 7,85 V (wyższej niż obecne na wejściu WE9 napięcie 6,71 V) na wejście nieodwracające 10US1. Powoduje to zmianę sygnału wyjściowego z komparatora US1 z poziomu niskiego 1,34 V na wysoki 6,46 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 5) wykazały, że zwarcie (03) w obwodach zasilania, polegające na połączeniu obwodu masy płytki do kolektora CT1 tranzystora T1 stanowiącego stabilizowane źródło napięcia odniesienia dla komparatora sygnałów US1, powoduje zmianę wartości napięcia CT1 z wartości 6,72 V na 6,70 V. Wywołuje to zmianę napięcia odniesienia dla wejścia odwracającego 9US1 z wartości 6,71 V na 6,70 V, mniejszej niż napięcie na wejściu nieodwracającym 10US1. Powoduje to zmianę sygnału wyjściowego z komparatora US1 z poziomu niskiego 1,34 V na wysoki 7,06 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

4.2. Modelowanie zwarć do obwodów wzmacniaczy US1 i US2

Następnie wykonano badania wpływu modelowanych zwarć na fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego dla zwarć pomiędzy wybranymi punktami płytki wzmacniaczy a obwodami sygnałowymi zawierającymi wzmacniacze operacyjne US1 i US2 (rys. 6).



Rys. 6. Model symulacyjny wpływu rezystancji izolacji wybranych obwodów elektrycznych ze wzmacniaczami US1 i US2 na fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego [8]

Sprawdzenie odległości rozmieszczenia punktów zwarcia na płycie wzmacniaczy pozwoliło wybrać 3 przypadki fałszywego zadziałania systemu (tabela 2 - kolor żółty):

1. Zwarcie (04) w obwodach sterowania polegające na połączeniu obwodu zasilania 7US1 do wyjścia 5US1 komparatora sygnałów US1, stanowiącego układ sterowania dla wzmacniacza sygnałów US2 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 310 Ω).
2. Zwarcie (05) w obwodach sterowania polegające na połączeniu obwodu masy 1US2 do wyjścia 5US2 wzmacniacza sygnałów US2, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T3 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 50 Ω).
3. Zwarcie (06) w obwodach sterowania polegające na połączeniu obwodu masy 1US2 do wejścia 10US2 wzmacniacza sygnałów US2, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T3 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 10 Ω).

Tabela 2

Wartości maksymalne rezystancji zwarcia dla wybranych obwodów sygnałowych powodujące fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego SSP-FK-BI

Zwarcia	WE9	WE10	9US1	10US1	5US1	9US2	10US2	5US2
MASA	X	142 Ω	X	4 M Ω	X	X	10 Ω	50 Ω
ZASIL	X	585 k Ω	1 M Ω	X	1 k Ω	2 M Ω	990 Ω	X
BT1	35 k Ω	32 k Ω	665 k Ω	X	98 k Ω	98 k Ω	X	X
CT1	190 Ω	4 k Ω	650 Ω	X	35 k Ω	X	19 k Ω	X
ET1	365 k Ω	360 k Ω	1 M Ω	X	345 k Ω	480 k Ω	213 k Ω	1 k Ω
BT2	X	X	X	X	X	X	X	X
CT2	X	X	X	X	X	X	X	X
ET2	X	360 k Ω	3 M Ω	X	345 k Ω	480 k Ω	X	X
7US1	X	X	X	X	310 Ω	X	X	X
7US2	X	X	X	X	X	X	X	X
WE9	X	X	X	X	X	X	X	X
WE10	X	X	X	X	X	X	X	X
9US1	X	X	X	X	X	X	X	X
10US1	X	X	X	X	135 k Ω	150 k Ω	950 Ω	11 k Ω
5US1	X	X	X	135 k Ω	X	X	X	X
9US2	X	X	X	150 k Ω	X	X	X	X
10US2	X	X	X	950 Ω	X	X	X	400 k Ω
5US2	X	X	X	11 k Ω	X	X	400 k Ω	X
12US1	X	X	X	X	X	X	X	X
12US2	X	X	X	X	X	X	X	X
BT3	X	X	X	1 M Ω	X	X	75 k Ω	X
CT3	570 k Ω	10 k Ω	10 k Ω	765 k Ω	10 k Ω	X	75 k Ω	20 k Ω
ET3	X	48 Ω	X	795 k Ω	X	X	50 k Ω	X
BT4	11 k Ω	11 k Ω	11 k Ω	3 M Ω	10 k Ω	8 k Ω	400 k Ω	21 k Ω
CT4	125 Ω	325 Ω	X	135 k Ω	1 k Ω	18 Ω	267 k Ω	1 k Ω
ET4	70 Ω	48 Ω	X	500 k Ω	X	X	300 k Ω	120 Ω

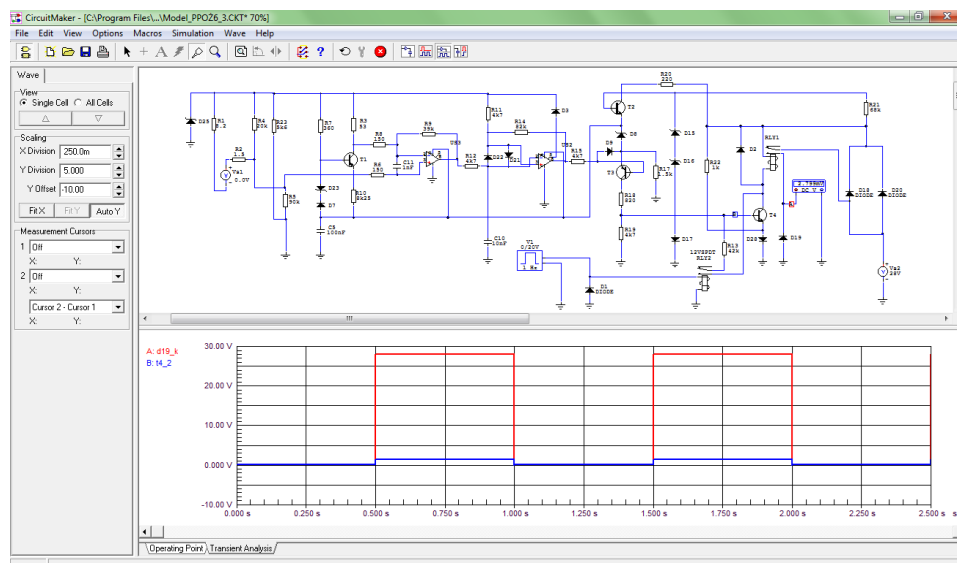
Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 6) wykazały, że zwarcie (04) w obwodach sterowania, polegające na połączeniu obwodu zasilania 7US1 do wyjścia 5US1 komparatora sygnałów US1, powoduje zmianę wartości napięcia wyjściowego 5US2 wzmacniacza sygnałów US2 z poziomu wysokiego 7,33 V na niski 0,83 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 6) wykazały, że zwarcie (05) w obwodach sterowania, polegające na połączeniu obwodu masy 1US2 do wyjścia 5US2 wzmacniacza US2, powoduje zmianę napięcia 5US2 z poziomu wysokiego 7,33 V na niski 0,76 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 6) wykazały, że zwarcie (06) w obwodach sterowania, polegające na połączeniu obwodu masy 1US2 do wejścia 10US2 wzmacniacza US2, powoduje zmianę napięcia 5US2 z poziomu wysokiego 7,33 V na niski 0,93 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

4.3. Modelowanie wpływu zwarć do obwodów tranzystorów T3 i T4

Badania wpływu modelowanych zwarć na fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego zakończono dla zwarć pomiędzy wybranymi punktami płytki wzmacniaczy a obwodami wyjściowymi zbudowanymi na tranzystorach T3 i T4 (rys. 7).



Rys. 7. Model symulacyjny wpływu rezystancji izolacji wybranych obwodów elektrycznych z tranzystorami T3 i T4 na fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego [8]

Sprawdzenie odległości rozmieszczenia punktów zwarcia na płytce wzmacniaczy pozwoliło wybrać 5 przypadków fałszywego zadziałania systemu (tabela 3 – kolor żółty):

1. Zwarcie (07) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT3 do bazy BT3 tranzystora T3, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T4 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 6 k Ω).

2. Zwarcie (08) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT3 do emitera ET3 tranzystora T3, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T4 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 6 kΩ).
3. Zwarcie (09) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT4 do bazy BT4 tranzystora T4, stanowiącego układ sterowania zasilaniem dla przekaźnika RES-52 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 42 kΩ).
4. Zwarcie (10) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT4 do emitera ET4 tranzystora T4, stanowiącego układ sterowania zasilaniem dla przekaźnika RES-52 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 2,8 kΩ).
5. Zwarcie (11) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu zasilania za diodami D18 i D20 do bazy BT4 tranzystora T4, stanowiącego układ sterowania zasilaniem dla przekaźnika RES-52 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 49 kΩ).

Tabela 3

Wartości maksymalne rezystancji zwarcia dla wybranych obwodów wyjściowych powodujące fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego SSP-FK-BI

Zwarcia	12US1	12US2	BT3	CT3	ET3	BT4	CT4	ET4
MASA	X	X	X	X	X	X	2K	X
ZASIL	X	X	X	X	1 kΩ	49 kΩ	X	X
BT1	X	X	X	14 kΩ	X	14 kΩ	170 Ω	X
CT1	X	X	X	225 kΩ	200 kΩ	805 kΩ	29 kΩ	845 Ω
ET1	X	X	606 kΩ	500 kΩ	505 kΩ	1 MΩ	785 kΩ	1 MΩ
BT2	X	X	X	X	X	X	180 kΩ	X
CT2	X	X	X	X	X	X	X	X
ET2	X	X	X	14 kΩ	310 Ω	25 kΩ	915 Ω	X
7US1	X	X	X	X	X	X	X	X
7US2	X	X	X	X	X	X	X	X
WE9	X	X	X	570 kΩ	X	11 kΩ	125 Ω	70 Ω
WE10	X	X	X	10 kΩ	48 Ω	11 kΩ	325 Ω	48 Ω
9US1	X	X	X	10 kΩ	X	11 kΩ	X	X
10US1	X	X	1 kΩ	765 kΩ	795 kΩ	3 MΩ	135 kΩ	500 kΩ
5US1	X	X	X	10 kΩ	X	10 kΩ	1 kΩ	X
9US2	X	X	X	X	X	8 kΩ	18 Ω	X
10US2	X	X	75 kΩ	75 kΩ	50 kΩ	400 kΩ	267 kΩ	300 kΩ
5US2	X	X	X	20 kΩ	X	21 kΩ	1 kΩ	120 Ω
12US1	X	X	X	X	X	X	X	X
12US2	X	X	X	X	X	X	X	X
BT3	X	X	X	6 kΩ	X	8 kΩ	1 kΩ	X
CT3	X	X	6 kΩ	X	6 kΩ	575 Ω	44 kΩ	235 Ω
ET3	X	X	X	6 kΩ	X	9 kΩ	1 kΩ	705 Ω
BT4	X	X	8 kΩ	575 Ω	9 kΩ	X	42 kΩ	X
CT4	X	X	1 kΩ	44 kΩ	1 kΩ	42 kΩ	X	2,8 kΩ
ET4	X	X	X	235 Ω	705 Ω	X	2,8 kΩ	X

Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 7) wykazały, że zwarcie (07 i 08) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT3 do bazy BT3 (lub do emitera ET3) tranzystora T3, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T4, powoduje zmianę wartości napięcia na bazie BT3 z poziomu wysokiego 6,20 V na niższy 5,12 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 7) wykazały, że zwarcie (09 i 11) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT4 (lub obwodu zasilania płytki) do bazy BT4 tranzystora T4, stanowiącego układ sterowania zasilaniem dla przekaźnika RES-52, powoduje zmianę wartości napięcia na bazie BT4 z poziomu niskiego 0,00 V na wysoki 1,47 V, co wywołuje zadziałanie płytki wzmacniaczy.

Badania funkcjonalne modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy (rys. 7) wykazały, że zwarcie (10) jako bezpośrednie połączenie (przez rezystancję zwarcia) obwodu kolektora CT4 do obwodu emitera ET4 powoduje uruchomienie przekaźnika RES-52 i zadziałanie płytki wzmacniaczy bez udziału tranzystora T4.

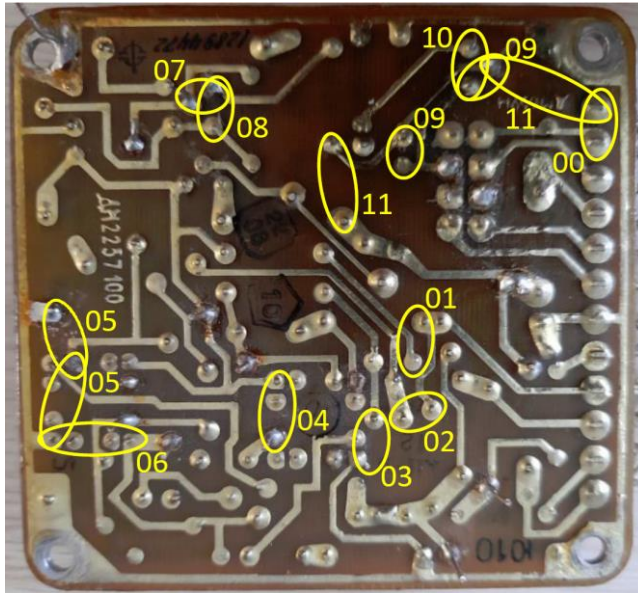
4.4. Lokalizacja zwarć obwodów elektrycznych na płycie wzmacniaczy

Na podstawie analizy parametrów energetycznych poszczególnych elementów elektronicznych (dopuszczalne natężenie prądu w obwodach elektrycznych i napięcia na elementach elektronicznych) oraz przy założeniu, że zwierane punkty obwodów nie mogą być oddalone od siebie o więcej niż 1 cm (przyjęta maksymalna średnica kropli wody przewodzącej) określono przypadki od (01) do (11) zwarć symulowanych na płycie wzmacniaczy, mogących powodować fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego w warunkach zasilania napięciem znamionowym 28,5 V oraz przepięć [8, 17].

Przypadkiem dodatkowym, nie poddanym badaniom symulacyjnym ze względu na jego oczywistość, jest bezpośrednie zwarcie (00) obwodu zasilania (końcówka 1) do obwodu wyjściowego sygnału o pożarze (końcówka 2) na płycie wzmacniaczy.

Zidentyfikowane w badaniach symulacyjnych punkty zwarcia o ww. numerach, powodujące fałszywe zadziałanie systemu, przedstawiono na tle płytki wzmacniaczy prezentowanej od strony ścieżek obwodów drukowanych (rys. 8).

Wyniki wykonanych badań symulacyjnych wpływu zmniejszenia rezystancji izolacji wybranych obwodów elektrycznych płytki wzmacniaczy na możliwość powstawania warunków do fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego stanowią materiał wyjściowy do weryfikacji w ramach badań eksperymentalnych.



Rys. 8. Lokalizacja punktów zwarcia dla wybranych obwodów elektrycznych modelowanej płytki wzmacniaczy powodujących fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego (kolor żółty) [8]

Do realizacji badań eksperymentalnych wykorzystany został model zwarcia stosowany w modelu symulacyjnym płytki wzmacniaczy, który podłączany jest pomiędzy wybrane punkty obwodów elektrycznych (rys. 5÷7). Model zwarcia zawiera włączaną skokowo rezystancję izolacji (R_{13}) pomiędzy wybranymi punktami obwodów. Zmieniając wartość rezystancji obwodu zwarcia należy wykonać sprawdzenia czy zmniejszenie rezystancji spowoduje fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego. Do oceny wyników badań należy wybrać szczególnie te obwody elektryczne, które na płycie wzmacniaczy bezpośrednio sąsiadują ze sobą i są narażone na zwarcia.

5. Wyniki badań eksperymentalnych systemu SSP-FK

Badania eksperymentalne w zakresie możliwości fałszywego zadziałania bloku wykonawczego SSP-FK-BI od zwarć wywołanych wpływem wilgoci (wody), przy zasilaniu napięciem znamionowym 28,5 V oraz w warunkach przepięć [8, 17], miały na celu określenie maksymalnej rezystancji między obwodami na płycie wzmacniaczy, przy której nastąpi zamknięcie styków przekaźnika RES-52, a przekaźnik wykonawczy TKE-54PODG przejdzie w stan tzw. samopodtrzymania zasilania.

Weryfikacja objęła przypadki wybrane w badaniach numerycznych, uwzględniające ograniczenie parametrów energetycznych poszczególnych elementów elektronicznych (dopuszczalne natężenie prądu w obwodach elektrycznych i napięcia na elementach

elektronicznych) oraz założenie, że zwierane punkty obwodów nie mogą być oddalone od siebie o więcej niż 1 cm (maksymalna średnica kropli wody przewodzącej).

5.1. Weryfikacja wpływu zwarć do obwodów tranzystorów T3 i T4

Dla przyjętych warunków potwierdzono następujące przypadki zwarć między obwodami zasilania z tranzystorami T1 i T2 na płycie wzmacniaczy, symulowanych poprzez nałożenie kropli wody i mogących powodować fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego:

1. Zwarcie (01) w obwodach zasilania polegające na połączeniu obwodu wejścia WE9 do emitera ET1 tranzystora T1, stanowiącego stabilizowane źródło napięcia odniesienia dla komparatora sygnałów US1 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 6,8 k Ω).
2. Zwarcie (02) w obwodach zasilania polegające na połączeniu obwodu wejścia WE9 do bazy BT1 tranzystora T1, stanowiącego stabilizowane źródło napięcia odniesienia dla komparatora sygnałów US1 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 470 Ω).
3. Zwarcie (03) w obwodach zasilania polegające na połączeniu obwodu masy do kolektora CT1 tranzystora T1, stanowiącego stabilizowane źródło napięcia odniesienia dla wzmacniacza US1 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 9,1 k Ω).

Badania wykazały również, że zjawisko fałszywego zadziałania bloku wykonawczego SSP-FK-BI (w warunkach zmiany rezystancji izolacji obwodów lub parametrów elementów elektronicznych wywołanej zawilgoceniem) zachodzi nie tylko dla chwilowych przepięć spowodowanych zmianą obciążenia w sieci elektroenergetycznej, ale także przy znamionowym napięciu zasilania systemu przeciwpożarowego SSP-FK, co jest zgodne z wynikami eksperymentów ITWL [15-17].

5.2. Weryfikacja wpływu zwarć do obwodów wzmacniaczy US1 i US2

Dla przyjętych warunków potwierdzono następujące przypadki zwarć między obwodami sterowania z układami US1 i US2 na płycie wzmacniaczy, symulowanych poprzez nałożenie kropli wody i mogących powodować fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego:

1. Zwarcie (04) w obwodach sterowania polegające na połączeniu obwodu zasilania 7US1 do wyjścia 5US1 komparatora sygnałów US1, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T3 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 4,6 k Ω).

Dodatkowo stwierdzono fałszywe zadziałanie bloku dla zwarcia (12) między 9US1 a obwodem masy (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 31,7 k Ω) oraz dla zwarcia (13) między 12US2 a obwodem masy (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 13,3 k Ω).

Nie potwierdzono fałszywego zadziałania bloku wykonawczego dla następujących przypadków zwarć między obwodami sterowania z układami US1 i US2:

1. Zwarcie (05) w obwodach sterowania polegające na połączeniu obwodu masy 1US2 do wyjścia 5US2 wzmacniacza sygnałów US2, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T3 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 50 Ω).
2. Zwarcie (06) w obwodach sterowania polegające na połączeniu obwodu masy 1US2 do wejścia 10US2 wzmacniacza sygnałów US2, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T3 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 10 Ω).

Badania wykazały również, że zjawisko fałszywego zadziałania bloku wykonawczego SSP-FK-BI (w warunkach zmiany rezystancji izolacji obwodów lub parametrów elementów elektronicznych wywołanej zawilgoceniem) zachodzi nie tylko dla chwilowych przepięć spowodowanych zmianą obciążenia w sieci elektroenergetycznej, ale także przy znamionowym napięciu zasilania systemu przeciwpożarowego SSP-FK, co jest zgodne z wynikami ekspertyz ITWL [15–17].

5.3. Weryfikacja wpływu zwarć do obwodów tranzystorów T3 i T4

Dla przyjętych warunków potwierdzono następujące przypadki zwarć między obwodami wyjściowymi z tranzystorami T3 i T4 na płycie wzmacniaczy, symulowanych poprzez nałożenie kropli wody i mogących powodować fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego:

1. Zwarcie (07) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT3 do bazy BT3 tranzystora T3, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T4 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 10,3 k Ω).
2. Zwarcie (08) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT3 do emitera ET3 tranzystora T3, stanowiącego układ sterowania dla tranzystora T4 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 9,9 k Ω).
3. Zwarcie (09) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT4 do bazy BT4 tranzystora T4, stanowiącego układ sterowania zasilaniem dla przekaźnika RES-52 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 36,1 k Ω).
4. Zwarcie (10) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu kolektora CT4 do emitera ET4 tranzystora T4, stanowiącego układ sterowania zasilaniem dla przekaźnika RES-52 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 1,6 k Ω).
5. Zwarcie (11) w obwodach wyjściowych polegające na połączeniu obwodu zasilania za diodami D18 i D20 do bazy BT4 tranzystora T4, stanowiącego układ sterowania zasilaniem dla przekaźnika RES-52 (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 60,4 k Ω).

Dodatkowo stwierdzono fałszywe zadziałanie bloku dla zwarcia (14) między bazą BT3 tranzystora T3 a obwodem masy (maksymalna rezystancja zwarcia wynosi 3,8 k Ω).

Badania wykazały również, że zjawisko fałszywego zadziałania „mokrego” bloku wykonawczego SSP-FK-BI (w warunkach zmiany rezystancji izolacji obwodów lub parametrów elementów elektronicznych wywołanej zawilgoceniem) zachodzi

nie tylko dla chwilowych przepięć spowodowanych zmianą obciążenia w sieci elektroenergetycznej, ale także przy znamionowym napięciu zasilania systemu przeciwpożarowego SSP-FK, co jest zgodne z wynikami ekspertyz ITWL [15-17].

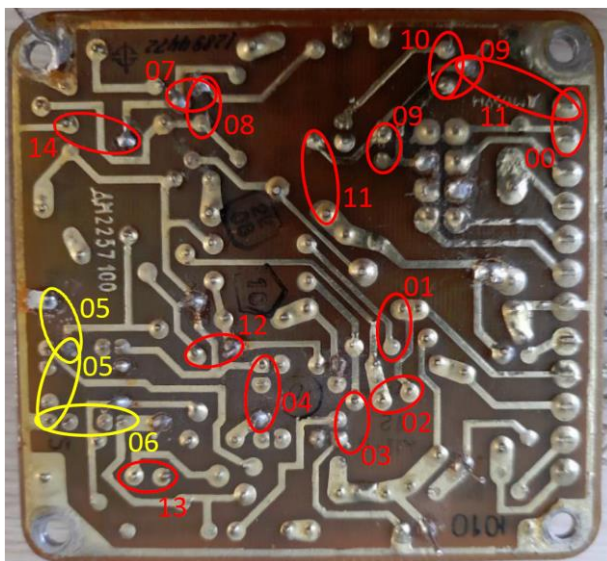
W wykonanych w ITWL badaniach laboratoryjnych potwierdzono, że fałszywe zadziałanie systemu przeciwpożarowego SSP-FK może wystąpić we wszystkich rozpatrywanych obwodach: zasilania, sterowania i wyjściowych płytki wzmacniaczy. Otrzymane wyniki badań laboratoryjnych wspomagały przyjętą w czasie prac Komisji Badania Wypadków Lotniczych hipotezę o możliwości fałszywego zadziałania systemu SSP-FK na skutek zwarć wywołanych zawilgoceniem płytek wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI i chwilowych przepięć występujących w pokładowej sieci elektroenergetycznej [8, 17].

Badania eksperymentalne „mokrego” bloku wykonawczego SSP-FK-BI wykonane na stanowisku badawczym (rys. 9) w Wojskowych Zakładach Lotniczych WZL-1 Łódź S.A. wykazały, że możliwe zwarcia między wybranymi elementami elektronicznymi w obwodach płytek wzmacniaczy (m.in. zwarcie obwodu kolektora i bazy lub obwodu kolektora i emitera tranzystora T4) powodują uruchomienie przekaźnika RES-52 na płycie wzmacniaczy i fałszywe zadziałanie układu sygnalizacji pożaru [8, 17].



Rys. 9. Widok stanowiska do badań wpływu zwarć w obwodach bloku wykonawczego [8]

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji ustalone zostały połączenia zwarciove (rys. 10), które powodują fałszywe zadziałanie systemu przeciwpożarowego SSP-FK na pokładzie śmigłowca Mi-8, wywołane wpływem wilgoci i przepięciami w zasilaniu bloku wykonawczego SSP-FK-BI [8, 17].



Rys. 10. Lokalizacja punktów zwarcia dla obwodów elektrycznych rzeczywistej płytki wzmacniaczy powodujących fałszywe zadziałanie bloku wykonawczego SSP-FK-BI (kolor czerwony) [8]

Wyniki symulacji komputerowych i badań weryfikacyjnych zostały wykorzystane do diagnostyki systemu SSP-FK w WZL-1 Łódź S.A. oraz w trakcie badania wybranych przypadków jego samoczynnego zadziałania (m.in. ekspertyzy realizowane w ITWL).

6. Podsumowanie

Celem badań numerycznych opracowanego modelu symulacyjnego działania bloku wykonawczego SSP-FK-BI było zweryfikowanie hipotezy o możliwości fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK w warunkach zwarć elektrycznych [8, 15-17]. Wykonane badania dotyczyły określenia przypadków fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK podczas występowania wybranych czynników elektrycznych (wpływ napięć i zmian wartości parametrów technicznych elementów elektronicznych) i czynników środowiskowych (wpływ wilgoci na rezystancję izolacji), powodujących zwarcia między obwodami elektrycznymi na płytce elektronicznej bloków wykonawczych lub obwodów zasilania w złączach elektrycznych tych bloków.

Badania wykazały, że szczególnym przypadkiem w modelowaniu działania systemu przeciwpożarowego SSP-FK, w którym zachodzi fałszywe jego zadziałanie, jest występowanie lokalnych zwarć pomiędzy wybranymi obwodami elektrycznymi na płytce wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI, nie powodujących trwałego uszkodzenia jej elementów elektronicznych (niesprawność ustępuje po wysuszeniu płytki).

Efektom badań numerycznych opracowanego modelu symulacyjnego płytki wzmacniaczy bloku wykonawczego było pozyskanie informacji o specyficznych stanach działania systemu przeciwpożarowego SSP-FK [8, 9, 15-17] w specyficznych warunkach jego pracy (zwarciach w obwodach elektrycznych). Wykonane badania numeryczne wykazały, że przy powstaniu lokalnych zwarć nie wszystkie punkty pomiarowe na płycie wzmacniaczy charakteryzuje wystąpienie fałszywego zadziałania systemu. Część z tych zwarć może powodować tylko zmianę wartości natężenia prądów i potencjałów elektrycznych (bez wystąpienia fałszywej sygnalizacji pożaru), a część może powodować trwałe (kosztowne) uszkodzenie elementów elektronicznych.

Badania eksperymentalne systemu przeciwpożarowego SSP-FK potwierdziły większość wyników badań numerycznych opracowanego modelu symulacyjnego oraz sposobu przetwarzania sygnałów w systemie SSP-FK. Nieznaczne różnice w otrzymanych wartościach parametrów jego fałszywego zadziałania wynikają z ograniczeń modelowania i analizy zwarć obwodów elektrycznych w pakiecie Circuit-Maker.

W badaniach eksperymentalnych potwierdzono wnioski wynikające z wykonanych badań numerycznych, że jedną z możliwych przyczyn fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK jest wystąpienie lokalnych zwarć między obwodami na płycie wzmacniaczy bloku wykonawczego SSP-FK-BI [17]. Zwarcia te mogą być skutkiem zmniejszenia rezystancji izolacji pomiędzy obwodami elektrycznymi na płycie wzmacniaczy poddanej oddziaływaniu wilgoci (wody). Wartość podprogowa rezystancji zwarcia do fałszywego zadziałania płytki wzmacniaczy przy zasilaniu 28,5 V, może okazać się wystarczająca w chwili wystąpienia przepięcia w sieci zasilania. Przykładem jest obwód „zasilanie płytki – baza tranzystora T4”, który zawiera elementy elektroniczne (m.in. kondensatory) stanowiące układy filtrujące. Na skutek ich zwarć spowodowanego zawilgoceniem, następuje utrata właściwości filtrujących, a przepięcia w obwodach zasilania płytek wzmacniaczy mogą uruchomić układ sygnalizacji pożaru. Badania laboratoryjne wykazały dodatkowo, że przy obniżonej rezystancji izolacji obwodów tranzystora T4 oraz dla amplitudy impulsu zakłócającego rzędu +30 V i czasie trwania rzędu 10 ms na bazie tranzystora T4 występuje napięcie otwierające, które uruchamia przekaźnik RES-52. Potwierdza to przyjętą hipotezę badawczą o możliwości fałszywego zadziałania systemu SSP-FK na skutek zwarć i chwilowych przepięć występujących w pokładowej sieci elektroenergetycznej.

Posiadana w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych baza naukowo-badawcza i specjalizowane stanowiska badawcze w Wojskowych Zakładach Lotniczych WZL-1 S.A. umożliwiają wykonanie badań diagnostycznych systemu SSP-FK w zakresie określenia wpływu czynników środowiskowych na okoliczność wywołania fałszywego zadziałania spowodowanego zbyt małą wartością rezystancji izolacji, zmniejszonej pod wpływem oddziaływania wilgoci. Stwierdzono, że zakres badań diagnostycznych powinien być dobierany indywidualnie, po wykonaniu analizy przypadków fałszywego zadziałania systemu przeciwpożarowego SSP-FK i sformułowaniu wstępnych hipotez w zakresie jego potencjalnych przyczyn. Pozwala to na optymalizację procesu badawczego w ramach prowadzonych ekspertyz [15-17].

7. Literatura

1. Abu-Rub H., Malinowski M., Al-Haddad K.: *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, First Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2014.
2. Baranowski K., Welo A.: *Symulacja układów elektronicznych*, Spice Design Center, Warszawa, Mikom, 1996.
3. Bobak B.P.: *Bezpieczeństwo lotnictwa*, ISBN 966-575-171-9, Kijów, 2004.
4. Brożek D.: *Uszkodzenia sieci elektrycznych statków powietrznych*. WLOP, 2003.
5. Cadwallader L.C.: *Fire Protection System Operating Experience*, Review For Fusion Applications, 62, 2001.
6. Chen S.J., Hovde D.C., Peterson K.A., Marshall A.W.: *Fire Detection Using Smoke and Gas Sensors*, *Fire Saf. J.*, 42, 507–515, doi:10.1016/j.firesaf.2007.01.006, 2007.
7. Fijolek R.: *Collaboration in CircuitMaker extends to real time concurrency editing*. CircuitMaker, Blog Altium, 2016.
8. Głyda K.: *Badanie właściwości lotniczego systemu przeciwpożarowego*. Rozprawa doktorska, ITWL, Warszawa 2022.
9. Madonna V., Giangrande P., Galea M.: *Electrical Power Generation in Aircraft: review, challenges and opportunities*. IEEE, 2018, DOI: 10.1109/TTE.2018.2834142.
10. *Materiały opisowe Altium, CIRCUITMAKER SIMULATOR*. Przewodnik po programie. Altium Limited, Open Source Hardware, www.altium.com, 2019.
11. Norma Obronna MON: *Wojskowe statki powietrzne. Pokładowe układy zasilania elektrycznego. Podstawowe parametry, wymagania i badania*, NO-15-A200:2007.
12. Norma Obronna USA: *MIL-STD-704F (W/CHANGE-1)*, Department of Defense Interface Standard: *Aircraft Electric Power Characteristics* (05-Dec-2016), 2016.
13. *Samolot M-28B „Bryza”*. Opis techniczny samolotu. Część 2. Osprzęt/Uzbrojenie, PZL-Mielec S.A., Mielec 2001.
14. Setlak L., Ruda E.: *Review, Analysis and Simulation of Advanced Technology Solutions in Power Electronics Systems (PES) of More Electric Aircraft*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol: 9, No: 10, 2015.
15. Szelmanowski A., Pazur A., Głyda K.: *Badania diagnostyczne lotniczych systemów przeciwpożarowych w aspekcie ich samoczynnego zadziałania*. W: *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej*, tom 10, Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2016.
16. Szelmanowski A., Zieja M., Głyda K., Tokarski T.: *Research method of dynamic capability of an actuating block of the SSP-FK aircraft fire suppression system in false alarm aspect*. *Journal of KONES*, Vol. 23, 2016.
17. Szelmanowski A., Zieja M., Pazur A., Głyda K.: *Studying the Dynamic Properties of an Amplifier Board Execution Block in Terms of False Tripping of an Aircraft Fire Suppression System*. *Proceedings of the Engineer of the XXI Century*, Springer International Publishing: Cham, 2020.
18. Tooley M.H., Wyatt D.: *Aircraft Electrical and Electronic Systems: Principles, Operation and Maintenance*. Routledge: London 2011.