

Andrzej SZELMANOWSKI<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6183-0241,  
andrzej.szelmanowski@itwl.pl – corresponding author  
Andrzej PAZUR<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-3126-1110, andrzej.pazur@itwl.pl  
Romuald RZĄDKOWSKI<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-7321-0875, romuald.rzadkowski@itwl.pl  
Julia SZELMANOWSKA<sup>2</sup>, julia.szelmanowska@wum.edu.pl  
<sup>1</sup>*Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych), Poland*  
<sup>2</sup>*Medical University of Warsaw (Warszawski Uniwersytet Medyczny), Poland*

## WYZNACZANIE NIEZAWODNOŚCI ZŁOŻONEGO SYSTEMU TECHNICZNEGO NA PRZYKŁADZIE MOBILNEGO MODUŁU MEDYCZNEGO

### Determination of reliability for a complex technical system on the example of a mobile medical module

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono propozycję sposobu wyznaczania niezawodności całkowitej i częściowej dla mobilnego modułu medycznego jako złożonego systemu technicznego. Dedykowanymi funkcjami takiego modułu są podjęcie rannego z pola walki (w wersji podstawowej) oraz zabezpieczenie utrzymania jego funkcji życiowych i wykonywania niezbędnych zabiegów medycznych (w wersji rozszerzonej). Prace nad opracowaniem koncepcji lub zaawansowaną budową takich modułów wykorzystujących bezzatłogowe statki powietrzne jako drony transportowe są od kilku lat prowadzone przez wiele państw i firm lotniczych, m.in. agencję DARPA (USA) oraz ITWL (Polska). Pomimo że w Polsce nie ma jeszcze floty takich maszyn, to z doświadczeń w zarządzaniu statkami powietrznymi w Siłach Zbrojnych RP wynika potrzeba jednoczesnego zabezpieczenia eksploatacji takich modułów w informatyczny system wsparcia, wykorzystujący algorytmy i zależności matematyczne w zakresie wyznaczania niezawodności całkowitej i częściowej. Z uwagi na złożoność strukturalną mobilnego modułu medycznego (platforma nościela, napęd, wyposażenie awioniczne podstawowe i dodatkowe oraz wyposażenie medyczne podstawowe i rozszerzone) niezawodność całkowita i częściowa może być wyznaczana dla obiektu prostego (w wersji uproszczonej jako pełna niezawodność) lub systemu złożonego (jako całkowita i częściowa).

**Słowa kluczowe:** eksploatacja, niezawodność, złożony system techniczny

**Abstract:** *The article presents a proposal for a method to determine a total and partial reliability for a mobile medical module as a complex technical system. The dedicated functions of such a module are to evacuate the wounded from the battlefield (in the basic version) and to ensure the maintenance of his vital functions and the performance of necessary medical procedures (in the extended version). Work on developing the concept or advanced construction of such modules using unmanned aerial vehicles as transport drones has been carried out for several years by many countries and aviation companies, including: DARPA agency (USA) and AFIT (Poland). Even though there is no fleet of such machines in Poland yet, this comes from experience in managing aircraft in the Armed Forces RP results from the need to simultaneously secure the operation of such modules in an IT support system using algorithms and mathematical relationships in determining a total and partial reliability. Due to the structural complexity of the mobile medical module (carrier platform, drive, basic and additional avionics equipment and basic and extended medical equipment), a total and partial reliability can be determined for a simple object (in a simplified reliability version as full) or a complex system (as a total and partial reliability).*

**Keywords:** exploitation, reliability, technical complex system

Received: February 23, 2024 / Revised: March 4, 2024 / Accepted: March 11, 2024 / Published: March 28, 2024

## 1. Wprowadzenie

Jednym z aktualnych problemów naukowo-badawczych jest określenie możliwości budowy autonomicznych mobilnych modułów medycznych do zdalnego podnoszenia rannych oraz udzielania pierwszej pomocy medycznej [1]. Obecnie moduły medyczne w wersji załogowej obejmują: platformy powietrzne (samoloty i śmigłowce lotniczego pogotowia ratunkowego), lądowe (karetki pogotowia ratunkowego) i morskie (łódzie ratownicze). Tworzone są także kontenery medyczne mające pełnić funkcje mini szpitali z wyposażeniem do wykonywania zabiegów medycznych ratujących życie [2].

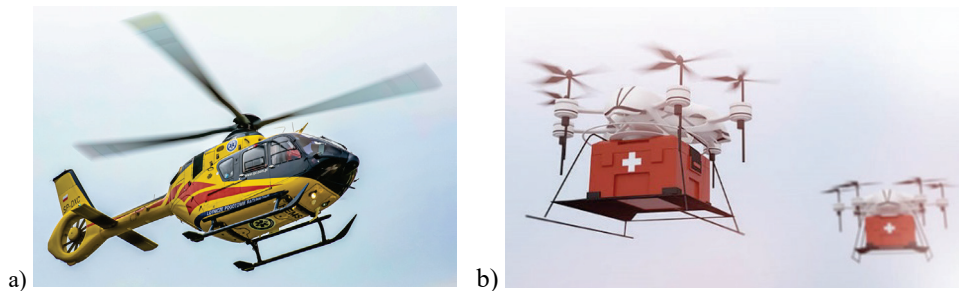
Dowodem na efektywne zastosowanie bezzałogowych modułów mobilnych jest przykład autonomicznych łazików kosmicznych (księżycowych lub marsjańskich), wykonujących złożone funkcje (m.in. przemieszczanie się według zadanej trasy, pobieranie materiału skalnego). Jednym z podstawowych problemów technicznych jest kwestia zapewnienia im niezawodnej komunikacji radiowej i satelitarnej (do przekazywania sygnałów sterujących i informacji audiowizualnej) oraz algorytmów sterowania trybami pracy (np. komunikacja jawna/niejawna, serwery komunikacyjne) [3].

Przykładem pomyślnego zastosowania modułów autonomicznych w niesieniu pomocy medycznej rannym są drony powietrzne, które zmieniają medycynę pola walki i zwiększają szanse na uratowanie życia rannym [4]. Drony takie mogą przewozić świeże produkty krwi rannym żołnierzom na linii frontu, co ma kluczowe znaczenie dla medycyny wojskowej. Przewiduje się jednak, że w przyszłych konfliktach ranni żołnierze mogą być zmuszeni do

pozostania na linii frontu przez wiele dni, podczas gdy będą potrzebować transfuzji krwi lub innej poważnej opieki medycznej. Głównym problemem związanym z dostarczaniem krwi jest konieczność utrzymywania jej w określonych temperaturach, podobnie jak wielu farmaceutyków, w tym niektórych leków przeciwbólowych i antybiotyków.

W USA jednym z ambitnych programów badawczych finansowanych przez Agencję DARPA jest wprowadzenie robotyki na pokład drona medycznego, która wspomagana systemami sztucznej inteligencji powinna zapewnić te same złożone i szybkie możliwości podejmowania decyzji i udzielania pierwszej pomocy medycznej, co wojskowy personel medyczny i chirurdzy urazowi znajdujący się na polu walki [1, 5]. Jednym z przykładów opracowywanych technologii są inteligentne opaski uciskowe, które będą w stanie wykryć, czy należy je odpiąć. Opracowywane są także inne rozwiązania prowadzone automatycznie, które obejmują m.in. umieszczenie kroplówki lub cewnika [6].

W Polsce w obszarze cywilnym funkcje mobilnego modułu medycznego pełnią głównie śmigłowce Airbus Eurocopter EC135 HEMS (rys. 1a), wchodzące w skład Lotniczego Pogotowia Ratunkowego (LPR). Śmigłowiec EC135 jest wyposażony w dwa silniki turbowałowe, a ich sterowanie w nowszych wersjach odbywa się z użyciem systemu elektronicznego FADEC. Pozwala to częściowo odciążyć pilotów od ciągłej kontroli parametrów pracy silników i pozwala poświęcić większą część uwagi na zadania związane z rozpoznaniem i nawigacją. Możliwe jest opcjonalne wyposażenie śmigłowca w całkowicie elektroniczny system zobrazowania, tzw. *glass cockpit* poprzez zabudowę zintegrowanego systemu awionicznego MEGHAS i Flight Control Display System [7].

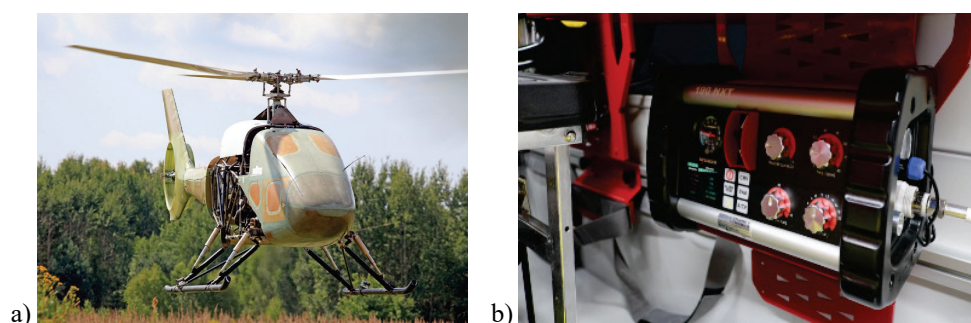


**Rys. 1.** Powietrzne platformy medyczne: załogowy śmigłowiec LPR (po lewej) oraz bezzałogowe moduły powietrzne do transportu sprzętu i wyposażenia medycznego (po prawej) [5]

Docelowym kierunkiem prowadzonych badań i prac rozwojowych jest zbudowanie bezzałogowego mobilnego modułu medycznego (rys. 1b), umożliwiające odległościowe naprowadzenie platformy powietrznej, wyszukanie rannego, podjęcie na pokład (w wersji podstawowej) oraz udzielenie pierwszej pomocy (w wersji zaawansowanej) [1, 5, 8].

Krokiem do budowy w pełni autonomicznego mobilnego modułu medycznego może być bezzałogowy śmigłowiec ILX-27 (rys. 2a), zbudowany przez ILot i ITWL, który jest

przykładem bezzałogowego śmigłowca-robota dedykowanego do zadań specjalnych. Śmigłowiec ten jest przeznaczony przede wszystkim do zastosowań militarnych, m.in. prowadzenia rozpoznania z powietrza, ewakuacji żołnierzy z zagrożonych rejonów, realizowania zadań transportowych oraz jako platforma dla różnych rodzajów uzbrojenia. Śmigłowiec ILX-27 może znaleźć także wiele zastosowań cywilnych, np.: akcje w rejonach klęsk żywiołowych, dużych budowli, mostów, węzłów kolejowych, obszarów rolnych i leśnych. Maksymalna masa startowa śmigłowca ILX-27 to 1100 kg. Śmigłowiec ten może udźwignąć sprzęt medyczny o masie nawet do 300 kg, osiągając prędkość maksymalną 215 km/h. Jego zasięg wynosi ok. 440 km, a maksymalny pułap to 4 km.



**Rys. 2.** Bezzałogowy śmigłowiec ILX-27 (po lewej) oraz respirator SPENCER 190 NXT dla mobilnego modułu medycznego (po prawej) [9]

Podstawowym elementem wyposażenia medycznego drona jako mobilnego modułu medycznego powinien być układ resuscytacyjny, obejmujący defibrylator i respirator. Przykładem takiego urządzenia jest przenośny respirator SPENCER 190 NXT (rys. 2b), który jest elektronicznym wentylatorem płucnym przeznaczonym do nieinwazyjnej wentylacji pacjentów dorosłych i pediatrycznych [9]. Posiada on zabezpieczenie przed przypadkowym uruchomieniem dźwigni wyboru mieszacza AIR, kolorowy manometr do łatwej identyfikacji zakresów ciśnienia oraz pozycjonowanie portów wejściowych i wyjściowych z boku urządzenia, co umożliwi łatwiejsze podłączanie i odłączanie oraz większą ochronę elementów podłączonych do urządzenia. Wentylator płucny działa w trzech trybach wentylacji: CMV (wentylacja rozpoczyna się zgodnie z ustalonymi parametrami), TVM (wentylacja zainicjowana zgodnie z ustawionymi parametrami tylko w przypadku uruchomienia przez pacjenta) oraz A/CV (wentylacja rozpoczynana w odstępach ustalonych przez ustawioną szybkość, chyba że została zainicjowana przez wcześniejsze uruchomienie przez pacjenta). Regulowana częstość oddechów wynosi od 5 do 40 BPM, a przepływ od 2 do 20 l/min (stężenie tlenu: 60% lub 100%) [9].

Jednym z aktualnych zagadnień badawczych jest wyznaczanie niezawodności dronów medycznych jako złożonych systemów technicznych, zawierających elementy o strukturze

niezawodnościowej szeregowej, równoległej i mieszanej [10, 11]. Wyniki badań mogą być wykorzystywane na etapie projektowania i zarządzania ich eksploatacją.

## **2. Metody stosowane w analizie niezawodności i gotowości operacyjnej złożonych systemów technicznych**

Do analizy niezawodności i gotowości operacyjnej mobilnego modułu medycznego, jako złożonego systemu technicznego, wykorzystano metodologię stosowaną do budowy systemu eksploatacji wojskowych statków powietrznych [10]. Przyjęto, że niezawodność systemu technicznego rozumiana jest jako prawdopodobieństwo sukcesu w postaci spełnienia przez system określonego wymagania lub jako prawdopodobieństwo tego, że zmiany określonych własności systemu nie przekroczą określonych granic w określonych warunkach jego pracy i może być charakteryzowana poprzez funkcję niezawodności.

Dla systemów technicznych o stałej wartości intensywności uszkodzeń  $\lambda_Z$  funkcja niezawodności systemu może być przedstawiona w postaci:

$$R_Z(t) = e^{-\lambda_Z t} \quad (1)$$

Zgodnie z [10], szukaną funkcję niezawodności złożonego układu technicznego o architekturze szeregowej można przedstawić w postaci:

$$R_{SZER}(t) = \prod_{i=1}^{i=N} R_i(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_N(t) \quad (2)$$

zaś o architekturze równoległej – w postaci:

$$R_{RÓWN}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{i=N} [1 - R_i(t)] = 1 - [1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - R_N(t)] \quad (3)$$

gdzie:

$R_1(t) = e^{-\lambda_1 t}$  – funkcja niezawodności platformy dla modułu nr 1;

$R_2(t) = e^{-\lambda_2 t}$  – funkcja niezawodności platformy dla modułu nr 2;

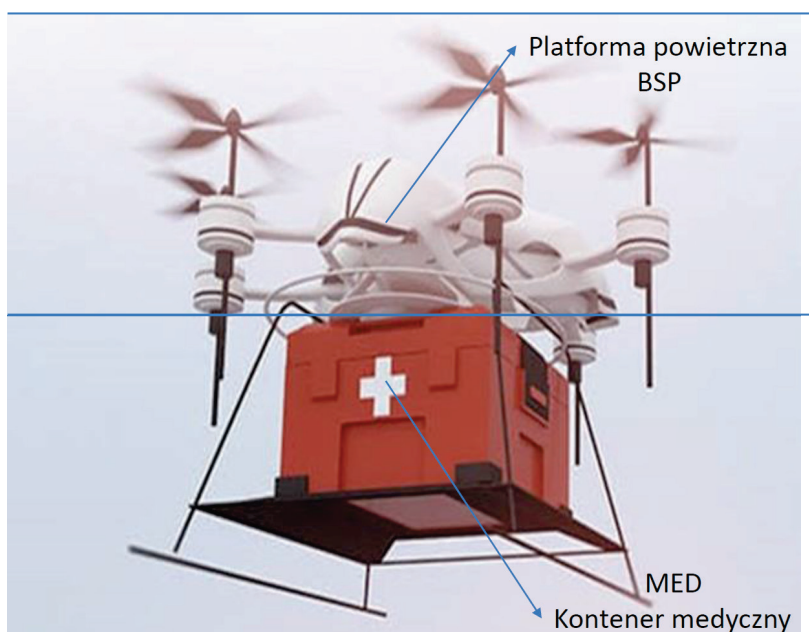
$R_N(t) = e^{-\lambda_N t}$  – funkcja niezawodności platformy dla modułu nr  $N$ .

Dla złożonych systemów technicznych o architekturze mieszanej (szeregowo-równoległej) stosuje się schematy zastępcze (upraszczające strukturę niezawodnościową) oraz odpowiednie kombinacje powyższych zależności. Dodatkowo można analizować wpływ intensywności uszkodzeń zmiennych w czasie według przyjętych funkcji [10, 11].

Powyższe zależności stanowią podstawę do analizy niezawodności całkowitej (dla całego mobilnego modułu medycznego) i częściowej (dla wybranych modułów składowych), których wyniki zostały przedstawione w dalszej części artykułu.

## 2.1. Architektura techniczna i struktura niezawodnościowa mobilnego modułu medycznego na przykładzie wielowirnikowca

Istotnym elementem w analizie niezawodności drona medycznego jako złożonego systemu mobilnego (rys. 3) jest układ napędowy. W platformach załogowych stosowane są głównie turbinowe silniki spalinowe (śmigłowce) lub silniki tłokowe i odrzutowe (samoloty). W platformach bezzałogowych stosowane są głównie silniki elektryczne, rzadziej tłokowe silniki spalinowe (wielowirnikowce) lub silniki odrzutowe w wersji mini (mini samoloty). Do zadań podejmowania rannych wykorzystywane mogą być głównie wielowirnikowce, z uwagi na możliwość zawisu lub lądowania w miejscu wypadku [5].

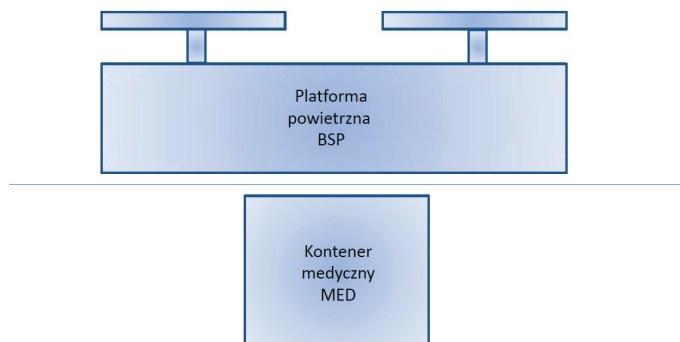


**Rys. 3.** Bezałogowy statek powietrzny jako mobilny moduł medyczny zawierający platformę powietrzną (część górna) oraz kontener medyczny (część dolna) [5]

Przykładem silnika elektrycznego dedykowanego dla dronów medycznych jest bezszczotkowy silnik T-MOTOR U15 II KV100 [12], którego imponujący maksymalny udźwig 36 kg czyni doskonałym rozwiązaniem do zadań wymagających dużej siły nośnej. Silnik ten charakteryzuje się optymalnym rozstawem osi, zapewnia dużą wydajność

i niezawodność w różnych warunkach operacyjnych. Jego parametry techniczne są na najwyższym poziomie, co świadczy o zaawansowanych osiągnięciach i wysokiej niezawodności. W komplecie z urządzeniem zdalnego sterowania FLAME 180A HV, które pełni funkcję urządzenia peryferyjnego, silnik T-MOTOR U15 II KV100 wykazuje zdolność do realizacji złożonych misji. Dzięki solidnej metalowej konstrukcji oraz markowej jakości silnik ten spełnia najwyższe standardy. Stanowi doskonale rozwiązanie dla dronów medycznych, które mogą być wykorzystywane do dostarczania niezbędnych środków i substancji medycznych w miejsca trudno dostępne lub w sytuacjach nagłych, wymagających niezawodnego działania.

Przykładem tłokowego silnika spalinowego dla drona medycznego jest silnik Rotron RT600 [12]. Jest to seria brytyjskich silników lotniczych opracowanych przez firmę Rotron Power, zaprojektowanych specjalnie do zastosowań w bezałogowych statkach powietrznych, lekkich samolotach i śmigłowcach. Silnik RT600 to dwuwirnikowy silnik Wankla o pojemności skokowej 600 cm<sup>3</sup>, chłodzony cieczą i napędzany paliwem naftowym. Silnik może być używany z napędem bezpośrednim lub z napędem redukcyjnym z paskiem zębatym wieloklinowym. Silnik ten wykorzystuje podwójny elektroniczny zapłon i generuje moc w zakresie od 53 do 100 KM (40 do 75 kW) przy 7500 obr/min, zależnie od wariantu. Silnik Rotron RT600 charakteryzuje się dużą niezawodnością działania, co sprawia, że jest atrakcyjnym rozwiązaniem do zastosowań lotniczych, w tym dużych dronów i innych bezałogowych statków powietrznych.



**Rys. 4.** Schemat mobilnego modułu medycznego w postaci wielowirnikowca zawierającego platformę powietrzną (część górna) oraz kontener medyczny (część dolna)

Układ napędowy drona medycznego zazwyczaj nie ma redundancji w postaci dodatkowych silników. Dlatego aby zapewnić jego wysoką niezawodność niezbędne są efektywne metody eksploatacji oraz wyspecjalizowane metody diagnostyczne, pozwalające na ocenę rzeczywistego stanu technicznego. Przykładem takich metod jest metoda tip-timingu TTM [13÷16] do analizy drgań łopatek silnika turbinowego oraz metoda



FAM-C [17÷20] do monitorowania zaburzeń ruchu obrotowego spowodowanych uszkodzeniami w układzie transmisji zespołu napędowego (łącznie z silnikiem).

Opracowany w ITWL schemat mobilnego modułu medycznego (rys. 4) zawiera moduł platformy powietrznej (część górna) oraz moduł kontenera medycznego (część dolna). Do realizacji zadań medycznych analiza niezawodności mobilnego modułu medycznego jako całości wymusza przyjęcie struktury szeregowej, z możliwością jej modyfikacji do struktury mieszanej (szeregowo-równoległej) wewnątrz modułów [10].

## 2.2. Architektura techniczna i struktura niezawodnościowa mobilnego modułu medycznego w zakresie platformy powietrznej

W skład platformy powietrznej, stanowiącej element transportowy mobilnego modułu medycznego, wchodzi układy składowe (rys. 5): układ łączności (COM), układ nawigacyjny (NAV), układ sterowania lotem (AUT) i układ napędowy (PIS). Układ napędowy stanowi główny układ platformy powietrznej o dużej niezawodności, umożliwiający przemieszczanie się drona powietrznego i w zależności od zastosowanego rozwiązania zawiera silniki elektryczne lub spalinowe (omówione w pkt. 2.1).



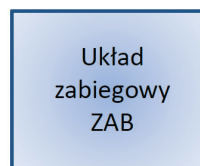
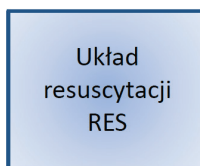
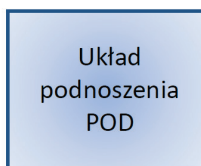
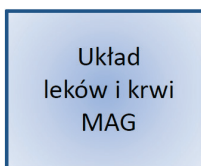
Rys. 5. Schemat modułu platformy powietrznej zawierającego układy: łączności, nawigacyjny, sterowania lotem i napędowy



Układ łączności stanowi element komunikacyjny drona z operatorem naziemnym sterującym jego lotem oraz operatorem modułu medycznego, może zawierać urządzenia łączności satelitarnej (SAT) i łączności radiowej (VHF/UHF). Układ nawigacyjny umożliwia nawigowanie w trybie autonomicznym z wykorzystaniem odbiornika łączności satelitarnej lub autonomicznego systemu nawigacyjnego (AHRS/INS). Układ sterowania lotem pracuje według sygnałów otrzymywanych od operatora naziemnego lub według zaprogramowanej trasy lotu.

### **2.3. Architektura techniczna i struktura niezawodnościowa mobilnego modułu medycznego w zakresie kontenera medycznego**

W skład modułu kontenera medycznego, stanowiącego element mobilnego modułu medycznego w zakresie podejmowania i utrzymania funkcji życiowych rannego, wchodzi układy składowe (rys. 6): układ leków i krwi (MAG), układ podnoszenia rannego (POD), układ resuscytacji (RES) i układ zabiegowy (ZAB). Układ resuscytacji stanowi główny układ kontenera medycznego o dużej niezawodności, w którego skład wchodzi przede wszystkim przenośny defibrylator i respirator (omówiony w pkt. 1).



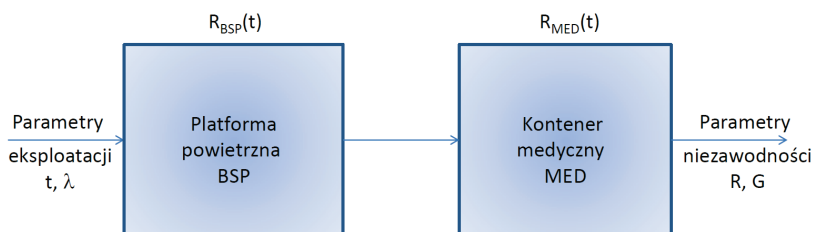
**Rys. 6.** Schemat modułu kontenera medycznego zawierającego układy: leków i krwi, podnoszenia rannego, resuscytacji i zabiegowy

Układ leków i krwi stanowi magazyn zawierający niezbędne substancje i środki do wykorzystania pokładowego lub do udzielania pomocy na zewnątrz drona. Układ podnoszenia umożliwia podejmowanie ранego i umieszczenie go w kontenerze medycznym. Układ zabiegowy, przy wsparciu układu resuscytacji, przewidziany jest do wykonywania zabiegów medycznych w przypadku ratowania życia w trybie wspomaganym przez operatora medycznego za pomocą układu łączności wizyjnej (COM) lub w trybie autonomicznym w wersji rozszerzonej (przyszłościowej).

### 3. Wyniki i dyskusja w zakresie badań niezawodności

W celu zaprezentowania sposobu wyznaczania całkowitej niezawodności złożonego systemu technicznego wybrano strukturę szeregową mobilnego modułu medycznego (rys. 7). Strukturę tę tworzą dwa wydzielone elementy systemu złożonego: moduł platformy powietrznej (BSP) oraz moduł kontenera medycznego (MED). Moduł platformy powietrznej można opisać funkcją niezawodności częściowej  $R_{BSP}(t)$ , natomiast moduł kontenera medycznego – funkcją niezawodności częściowej  $R_{MED}(t)$ .

Na potrzeby wykonanej analizy przyjęto, że w przypadku szczególnym funkcje te są funkcjami zależnymi od czasu eksploatacji, ale ze stałą wartością intensywności uszkodzeń. Parametrami wejściowymi w modelowanym złożonym systemie technicznym są intensywność uszkodzeń i czas eksploatacji. Parametrami wyjściowymi, wyliczonymi na podstawie przyjętych zależności matematycznych, są przebiegi czasowe funkcji niezawodności i gotowości operacyjnej (w wersji rozszerzonej).



**Rys. 7.** Struktura szeregową mobilnego modułu medycznego jako złożonego systemu technicznego z parametrami wejściowymi i wyjściowymi

Funkcję niezawodności całego mobilnego modułu medycznego jako urządzenia technicznego można przedstawić w postaci:

$$R_{BSP\_MED}(t) = R_{BSP}(t) \cdot R_{MED}(t) \quad (4)$$

gdzie:

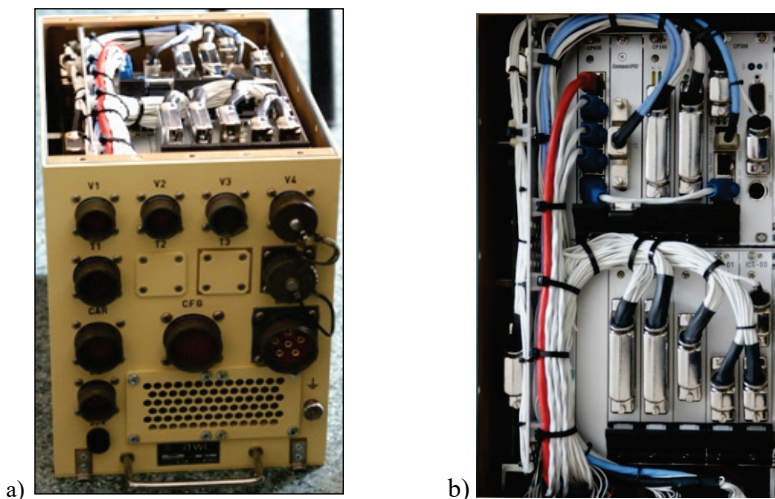
$R_{BSP}(t) = e^{-\lambda_{BSP} t}$  – funkcja niezawodności platformy powietrznej (BSP);

$R_{MED}(t) = e^{-\lambda_{MED} t}$  – funkcja niezawodności kontenera medycznego (MED).

Poniżej przedstawiono wyniki analizy wybranych przypadków wyznaczania funkcji niezawodności całkowitej i częściowej mobilnego modułu medycznego w zależności od przyjętej konfiguracji układów składowych – układu łączności i układu resuscytacji.

### 3.1. Niezawodność mobilnego modułu medycznego w zakresie platformy powietrznej dla różnych opcji układu łączności

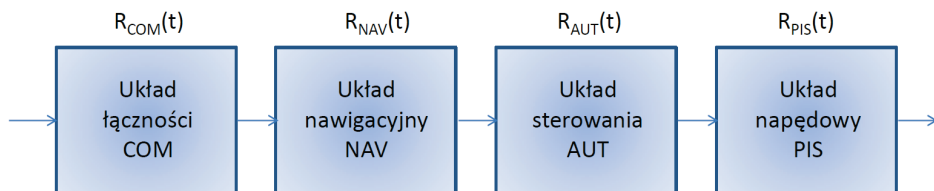
Istotnym elementem w analizie niezawodności złożonego systemu technicznego w postaci modułu platformy powietrznej jest układ łączności. Przykładem urządzenia dedykowanego dla takiego układu jest serwer komunikacyjny SK-1 (rys. 8), opracowany w ITWL i stosowany w zintegrowanym systemie łączności śmigłowców Mi-8, Mi-17, Mi-24 oraz śmigłowców W-3PL [21, 22].



**Rys. 8.** Serwer komunikacyjny SK-1: widok zewnętrzny ze złączami elektrycznymi (po lewej) oraz widok wnętrza z panelami obsługującymi kanały łączności (po prawej) [6]

Parametry niezawodnościowe określone dla serwera komunikacyjnego SK-1 [21] wykorzystano do analizy niezawodności złożonego modułu mobilnego. Przyjęto wartości intensywności uszkodzeń układu łączności:  $\lambda_{COM\_UHF} = 1 \times 10^{-3}$  [1/godz.].

W przypadku, gdy w module platformy powietrznej BSP nie występuje redundancja urządzeń, rozpatrywaną architekturę (rys. 9) można uznać za szeregowy łańcuch połączeń elementów składowych złożonego systemu technicznego [10].



**Rys. 9.** Szeregowy łańcuch połączeń elementów składowych modułu platformy powietrznej jako złożonego systemu technicznego

Zgodnie z teorią niezawodności [10, 23], funkcja niezawodności modułu platformy powietrznej (BSP) jako łańcucha szeregowego może być opisana w postaci:

$$R_{BSP}(t) = R_{COM}(t) \cdot R_{NAV}(t) \cdot R_{AUT}(t) \cdot R_{PIS}(t) \quad (5)$$

gdzie:

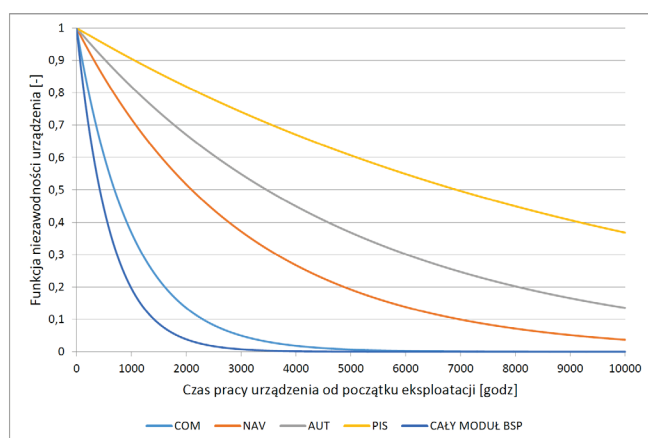
$R_{COM}(t) = e^{-\lambda_{COM}t}$  – funkcja niezawodności układu łączności (COM);

$R_{NAV}(t) = e^{-\lambda_{NAV}t}$  – funkcja niezawodności układu nawigacyjnego (NAV);

$R_{AUT}(t) = e^{-\lambda_{AUT}t}$  – funkcja niezawodności układu sterowania (AUT);

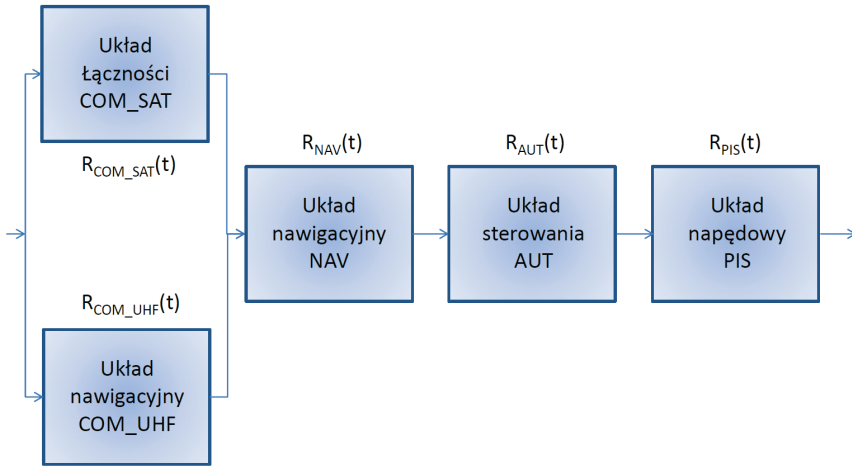
$R_{PIS}(t) = e^{-\lambda_{PIS}t}$  – funkcja niezawodności układu napędowego (PIS).

Dla przyjętych wartości intensywności uszkodzeń wybranych układów składowych (łączności, nawigacyjnego, sterowania lotem i napędowego) funkcja niezawodności modułu platformy powietrznej BSP jako łańcucha szeregowego może być przedstawiona w postaci wykresu (rys. 10) charakteryzującego niezawodność całkowitą dla całego modułu oraz niezawodność częściową dla elementów składowych.



**Rys. 10.** Przebiegi funkcji niezawodności całkowitej dla całego modułu platformy powietrznej oraz funkcji niezawodności częściowej dla poszczególnych układów składowych

W przypadku, gdy w module platformy powietrznej BSP występuje redundancja urządzeń składowych w układzie łączności COM (rys. 11), to rozpatrywaną architekturę można uznać za łańcuch mieszanych (szeregowo-równoległych) połączeń [10].



**Rys. 11.** Mieszany (równoległo-szeregowy) łańcuch połączeń elementów składowych modułu platformy powietrznej jako złożonego systemu technicznego

Dla zmodyfikowanej struktury platformy powietrznej z modulem COM składającym się z kanału łączności satelitarnej COM\_SAT i łączności radiowej COM\_UHF (rys. 11) niezawodność układu łączności może być opisana w postaci:

$$R_{COM}(t) = 1 - [1 - R_{COM\_SAT}(t)] \cdot [1 - R_{COM\_UHF}(t)] \quad (6)$$

stąd niezawodność modułu platformy powietrznej (BSP):

$$R_{BSP}(t) = \{ 1 - [1 - R_{COM\_SAT}(t)] \cdot [1 - R_{COM\_UHF}(t)] \} \cdot R_{NAV}(t) \cdot R_{AUT}(t) \cdot R_{PIS}(t) \quad (7)$$

gdzie:

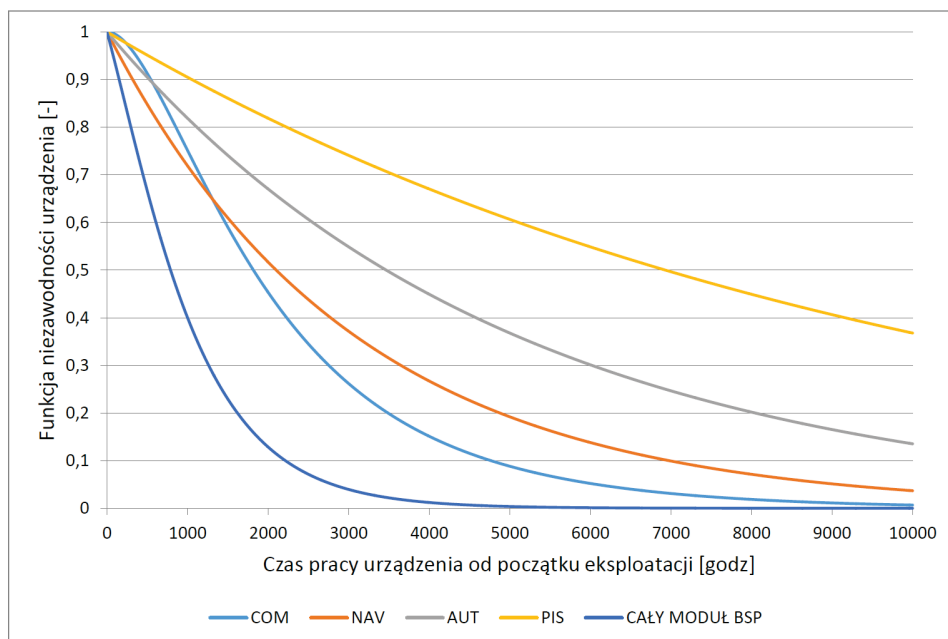
- niezawodność częściowa dla przypadku toru górnego:

$$R_{BSP/COM\_SAT}(t) = R_{COM\_SAT}(t) \cdot R_{NAV}(t) \cdot R_{AUT}(t) \cdot R_{PIS}(t) \quad (8)$$

- niezawodność częściowa dla przypadku toru dolnego:

$$R_{BSP/COM\_UHF}(t) = R_{COM\_UHF}(t) \cdot R_{NAV}(t) \cdot R_{AUT}(t) \cdot R_{PIS}(t) \quad (9)$$

Dla przyjętych w analizie wartości intensywności uszkodzeń:  $\lambda_{\text{COM\_SAT}} = 5 \times 10^{-4}$ ,  $\lambda_{\text{COM\_UHF}} = 1 \times 10^{-3}$  [1/godz.], charakterystycznych dla wybranych urządzeń mogących wchodzić w skład analizowanego układu łączności (COM), wyznaczone zostały przebiegi funkcji niezawodności (rys. 12) dla modułu platformy powietrznej (BSP).



**Rys. 12.** Przebiegi funkcji niezawodności całkowitej dla całego modułu platformy powietrznej oraz funkcji niezawodności częściowej dla poszczególnych układów składowych

Otrzymane wyniki analizy (rys. 10 i 12) wykazały, że dla zmodyfikowanej struktury platformy powietrznej z modułem COM o strukturze równoległej, składającym się z kanału łączności satelitarnej COM\_SAT i łączności radiowej COM\_UHF (rys. 11), niezawodność układu łączności przyjmuje wartości większe niż dla układu łączności składającego się tylko z jednego kanału łączności (satelitarnej albo radiowej).

Zwiększenie niezawodności układu łączności o strukturze równoległej powoduje jednocześnie, co jest oczywiste, zwiększenie niezawodności całego modułu platformy powietrznej (BSP). Jednocześnie jednak, poprzez zabudowę dodatkowych urządzeń, zwiększa masę i gabaryty całego modułu. Nie bez znaczenia jest również zwiększenie poboru prądu przez kanał łączności oraz kosztów całego modułu.

Głównym jednak kryterium przy projektowaniu mobilnego modułu medycznego, z uwagi na narzędzie do podejmowania rannego z pola walki i ratowania jego życia, powinna być jego wysoka niezawodność i gotowość operacyjna [3, 24].

### 3.2. Niezawodność mobilnego modułu medycznego w zakresie kontenera medycznego dla różnych opcji układu resuscytacji

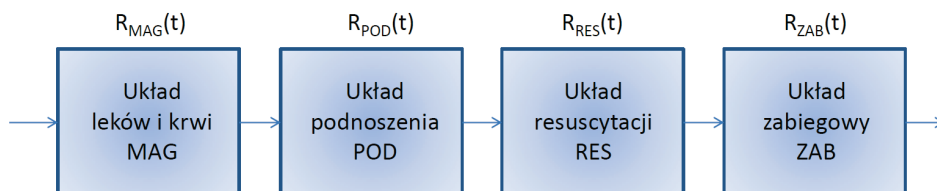
Istotnym elementem w analizie niezawodności złożonego systemu technicznego w postaci modułu kontenera medycznego jest układ resuscytacji. Przykładem urządzenia, dedykowanego dla takiego układu, jest przenośny respirator SPENCER 190 NXT (rys. 13), opracowany w firmie SPENCER (Włochy) i spełniający standardy referencyjne przyjęte w służbie zdrowia RP: EN 794-3, EN 1789, EN 60601-1, EN 60601-1-2, EN 60601-1-8 (numer homologacji E24 10R-041994) [9].



Rys. 13. Respirator SPENCER 190 NXT: widok zewnętrzny [9]

Parametry niezawodnościowe określone dla respiratora w danych producenta [9] wykorzystano do analizy niezawodności złożonego modułu mobilnego. Przyjęto wartości intensywności uszkodzeń układu resuscytacji:  $\lambda_{RES\_POD} = 1 \times 10^{-3}$  [1/godz].

W przypadku, gdy w module kontenera medycznego (MED) nie występuje redundancja urządzeń, rozpatrywaną architekturę (rys. 14) można uznać za szeregowy łańcuch połączeń elementów składowych złożonego systemu technicznego [10].



Rys. 14. Szeregowy łańcuch połączeń elementów składowych modułu kontenera medycznego (MED) jako złożonego systemu technicznego



Zgodnie z teorią niezawodności [10, 23], funkcja niezawodności modułu kontenera medycznego MED jako łańcucha szeregowego może być opisana w postaci:

$$R_{MED}(t) = R_{MAG}(t) \cdot R_{POD}(t) \cdot R_{RES}(t) \cdot R_{ZAB}(t) \quad (13)$$

gdzie:

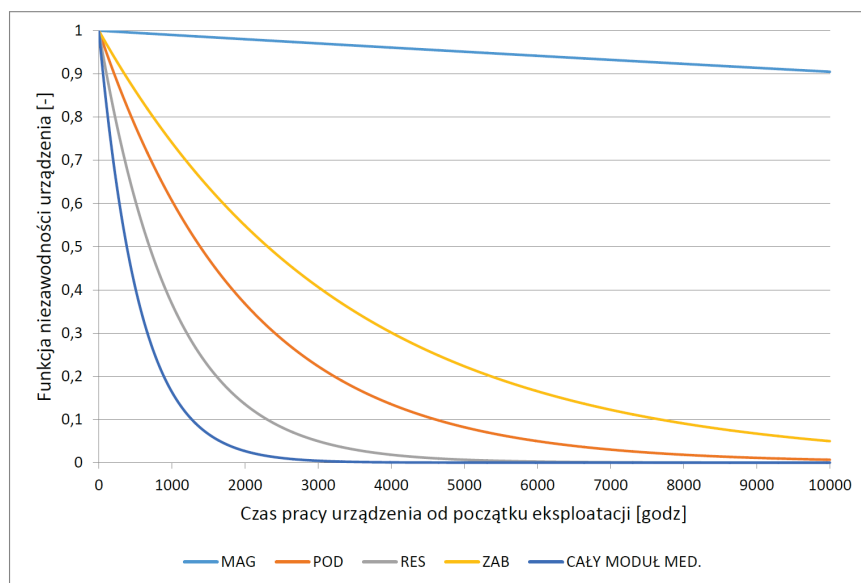
$R_{MAG}(t) = e^{-\lambda_{MAG}t}$  – funkcja niezawodności układu magazynu leków (MAG);

$R_{POD}(t) = e^{-\lambda_{POD}t}$  – funkcja niezawodności układu podnoszenia (POD);

$R_{RES}(t) = e^{-\lambda_{RES}t}$  – funkcja niezawodności układu resuscytacji (RES);

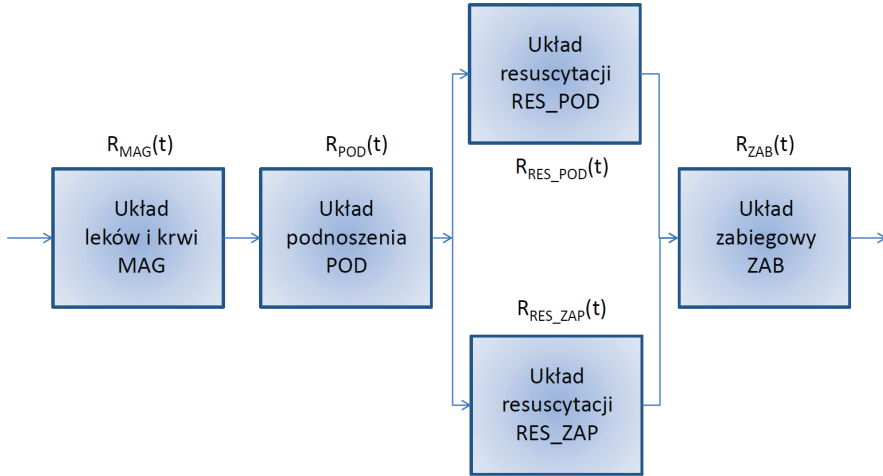
$R_{ZAB}(t) = e^{-\lambda_{ZAB}t}$  – funkcja niezawodności układu zabiegowego (ZAB).

Dla przyjętych wartości intensywności uszkodzeń wybranych układów składowych (leków i krwi, podnoszenia rannego, resuscytacji i zabiegowego) funkcja niezawodności modułu kontenera medycznego jako łańcucha szeregowego może być przedstawiona w postaci wykresu (rys. 15) charakteryzującego niezawodność całkowitą dla całego modułu oraz niezawodność częściową dla elementów składowych.



**Rys. 15.** Przebiegi funkcji niezawodności całkowitej dla całego modułu kontenera medycznego oraz funkcji niezawodności częściowej dla poszczególnych układów składowych

W przypadku, gdy w module kontenera medycznego MED występuje redundancja urządzeń składowych w układzie resuscytacji RES (rys. 16), to rozpatrywaną architekturę można uznać za łańcuch mieszanych (szeregowo-równoległych) połączeń [10].



**Rys. 16.** Mieszany (równoległo-szeregowy) łańcuch połączeń elementów składowych modułu kontenera medycznego jako złożonego systemu technicznego

Dla zmodyfikowanej struktury kontenera medycznego z układem RES składającym się z respiratora podstawowego RES\_POD i respiratora zapasowego RES\_ZAP (rys. 16) niezawodność może być opisana w postaci:

$$R_{RES}(t) = 1 - \left[ 1 - R_{RES\_POD}(t) \right] \cdot \left[ 1 - R_{RES\_ZAP}(t) \right] \quad (14)$$

stąd niezawodność modułu kontenera medycznego (MED):

$$R_{MED}(t) = R_{MAG}(t) \cdot R_{POD}(t) \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - R_{RES\_POD}(t) \right] \cdot \left[ 1 - R_{RES\_ZAP}(t) \right] \right\} \cdot R_{ZAB}(t) \quad (15)$$

gdzie:

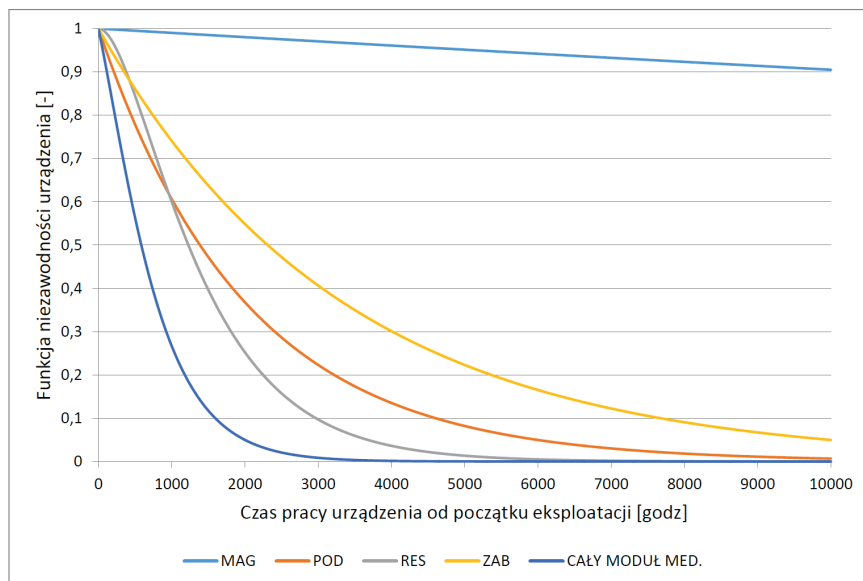
- niezawodność częściowa dla przypadku toru górnego:

$$R_{MED/RES\_POD}(t) = R_{MAG}(t) \cdot R_{POD}(t) \cdot R_{RES\_POD}(t) \cdot R_{ZAB}(t) \quad (16)$$

- niezawodność częściowa dla przypadku toru dolnego

$$R_{MED/RES\_ZAP}(t) = R_{MAG}(t) \cdot R_{POD}(t) \cdot R_{RES\_ZAP}(t) \cdot R_{ZAB}(t) \quad (17)$$

Dla przyjętych w analizie wartości intensywności uszkodzeń:  $\lambda_{RES\_POD} = 1 \times 10^{-3}$ ,  $\lambda_{RES\_ZAP} = 1 \times 10^{-3}$  [1/godz], charakterystycznych dla wybranych urządzeń mogących wchodzić w skład analizowanego układu resuscytacji RES, wyznaczone zostały przebiegi funkcji niezawodności (rys. 17) dla modułu kontenera medycznego (MED).



**Rys. 17.** Przebiegi funkcji niezawodności całkowitej dla całego modułu kontenera medycznego oraz funkcji niezawodności częściowej dla poszczególnych układów składowych

Otrzymane wyniki analizy (rys. 15 i 17) wykazały, że dla zmodyfikowanej struktury modułu medycznego z układem RES o strukturze równoległej, składającym się z kanału respiratora podstawowego RES\_POD i respiratora zapasowego RES\_ZAP (rys. 16), niezawodność układu resuscytacji RES przyjmuje wartości większe niż dla układu resuscytacji składającego się tylko z jednego kanału resuscytacji (podstawowej).

Zwiększenie niezawodności układu resuscytacji o strukturze równoległej powoduje jednocześnie, co jest oczywiste, zwiększenie niezawodności całego modułu kontenera medycznego (MED). Jednocześnie jednak, poprzez zabudowę dodatkowych urządzeń, zwiększa masę i gabaryty całego modułu. Nie bez znaczenia jest również zwiększenie poboru prądu przez kanał resuscytacji oraz kosztów całego modułu.

Głównym jednak kryterium przy projektowaniu mobilnego modułu medycznego, z uwagi na narzędzie do podejmowania ранego z pola walki i ratowania jego życia, powinna być jego wysoka niezawodność i gotowość operacyjna [3, 24].

## 4. Wnioski i podsumowanie

Dynamiczny rozwój środków bezzałogowych (dronów) umożliwia opracowanie efektywnych technologii medycznych w zakresie ratowania rannych na polu walki lub w wypadkach z obrażeniami ciała z wykorzystaniem mobilnych modułów medycznych.

Obecne zastosowanie dronów obejmuje m.in. przeprowadzanie oceny katastrof, dostarczanie paczek pomocowych na miejsce wypadku (lub pole walki), zapewnienie bezpiecznego transportu próbek do testów (np. testy na gruźlicę) oraz realizację zadań w obszarze medycyny geriatrycznej (roboty z ramionami manipulacyjnymi) [4, 8, 25].

Realizowane prace badawcze skupiają się na pozyskaniu danych i obrazów z miejsca klęski żywiołowej, tworzeniu map, przekazywaniu komunikatorów, wsparciu akcji poszukiwawczo-ratowniczych, dostarczaniu paczki pomocowej i ratowaniu życia. W planach jest wykorzystanie dronów do obrazowania diagnostycznego lub za pomocą sztucznej inteligencji wspomaganie działalności medycznej człowieka.

Zastosowanie dronów w telemedycynie obejmuje dostarczanie automatycznego defibrylatora zewnętrznego AED w przypadku pozaszpitalnego zatrzymania krążenia na obszarach zidentyfikowanych za pomocą GIS (Systemu Informacji Geograficznej). Takie badanie zostało przeprowadzone m.in. w Holandii. Przykładem jest projekt Health Integrated Rescue Operations HIRO, w ramach którego medycy i lotnicy połączyli siły i opracowali drona medycznego. Dron ten posiadał specjalizowane czujniki, wrażliwe na podcierwień, funkcje telemedyczne oraz wyposażony był w urządzenia umożliwiające prowadzenie wideokonferencji. Także firma Google uzyskała patent na opracowanie systemu zdolnego do wysyłania w nagłych przypadkach dronów przenoszących specjalistyczny sprzęt medyczny na miejsce wypadku lub pola walki [1, 4, 25, 26].

W aspekcie technicznym podstawowym problemem jest zapewnienie bezpiecznego dolotu do ранego znajdującego się na polu walki lub w innym niedogodnym do dotarcia miejscu (np. rejon zagrożony, górzysty, zalesiony, zalany), podjęcie ранego i odlotu (przetransportowania ранego do szpitala lub kontenera medycznego). Zapewnienie realizacji takich zadań wymaga m.in. budowy urządzeń o wysokim poziomie niezawodności oraz sposobów redundancji sprzętowej lub programowej [3, 22].

Problem badawczy przyjęty w prezentowanej pracy dotyczył sposobu modelowania niezawodności całkowitej i częściowej wyznaczanej dla złożonych systemów technicznych eksploatowanych w lotnictwie cywilnym i wojskowym, w szczególności w zastosowaniach poszukiwawczo-ratowniczych i medycznych z wykorzystaniem bezałogowych statków powietrznych. Aspektem naukowym i praktycznym pracy jest dobór odpowiedniej struktury tych modułów oraz zaprojektowanie architektury gwarantującej wysokie wskaźniki niezawodności całkowitej i częściowej [10, 11].

Przedstawione zależności matematyczne oraz wyniki stanowią podstawowe narzędzia pozwalające na wyznaczanie niezawodności całkowitej i częściowej złożonego systemu technicznego w postaci mobilnego modułu medycznego, składającego się z modułu platformy powietrznej oraz modułu kontenera medycznego.

Celem wykonanych analiz było opracowanie metody wyznaczania niezawodności całkowitej i częściowej systemu technicznego, w którym występuje utrata części jego funkcji umożliwiająca jednak wykonywanie innych zadań. Wyniki mogą być wykorzystane

w systemach zarządzania procesem eksploatacji statków powietrznych realizujących misje SAR i Combat SAR, w szczególności na etapie projektowania złożonych systemów technicznych w zakresie niezawodności i gotowości operacyjnej.

W aspekcie medycznym problemów jest znacznie więcej, od opracowania sposobu skutecznego i bezpiecznego podjęcia rannego z pola walki (automatycznego lub sterowanego przez operatora naziemnego), poprzez podłączenie do rannego układów zapewniających podtrzymanie funkcji życiowych, do wykonywania na pokładzie drona zabiegów medycznych (mini operacji) z wykorzystaniem robotów i personelu medycznego (znajdującego się w naziemnych stanowiskach sterowania).

Przedstawione sposoby wyznaczania niezawodności całkowitej i częściowej mają na celu zwrócenie uwagi na aspekty techniczne w odniesieniu do oceny zdolności mobilnego modułu medycznego i sposobu zarządzania tymi danymi poprzez specjalistyczne systemy informatyczne, nadzorowane w sposób uregulowany z opracowanymi procedurami.

Przykładem takiego systemu jest system SI TURAWA, opracowany w ITWL i przeznaczony do wspomagania zarządzania procesem eksploatacji statków powietrznych w Siłach Zbrojnych RP oraz lokalny system informatyczny wykorzystywany w Zakładzie Awioniki ITWL, dedykowany do zarządzania procesem eksploatacji zintegrowanego systemu łączności ZSŁ na śmigłowcach Mi-8, Mi-17, Mi-24 oraz W-3PL [3, 21].

Wprowadzanie danych do takiego systemu umożliwia wyznaczanie funkcji niezawodności dla poszczególnych elementów składowych systemu łączności ZSŁ, a zaprezentowany sposób analizy stanowi oryginalny wkład zespołu badawczego ITWL w rozwój systemów informatycznych zarządzających niezawodnością złożonych systemów technicznych, w perspektywie mobilnych modułów medycznych.

W obecnych zastosowaniach drony powietrzne jako mobilne moduły medyczne są wykorzystywane do transportu krwi. W dłuższej perspektywie istnieje wiele działań, takich jak wykorzystanie dronów do podejmowania rannych z pola walki lub rejonów zagrożenia. Jedną z istotnych kwestii w zabezpieczeniu powietrznych modułów medycznych na polu walki jest wykorzystanie technologii *stealth*, która wciąż się rozwija, lub utrzymywanie dronów w locie nisko nad ziemią i pilotowanie ich przez autonomiczny system z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Istnieje jednak wiele obaw związanych z wykorzystaniem dronów do wydobywania rannych żołnierzy z pola walki. Długoterminowym celem podjętych badań jest posiadanie na pokładzie tych dronów zautomatyzowanego modułu medycznego, który zapewniłby opiekę medyczną pacjentowi podczas transportu. Podjęte w ITWL prace mają służyć temu celowi.

## 5. Literatura

1. J. Braun, "The promising future of drones in prehospital medical care and its application to battlefield medicine," *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 87(1S), 2019, DOI: 10.1097/TA.0000000000002221.
2. K. Laksham, "Unmanned aerial vehicle (drones) in public health: A SWOT analysis," *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 8(2), 2019, DOI: 10.4103/jfmpc.jfmpc\_413\_18.
3. M. Zieja, A. Szelmanowski, A. Pazur and W. Paterek, *Possibilities and conditions of forming reliability and operational readiness of the ZSL integrated communication system for polish military helicopters*, Poland, Warsaw, AFIT, 2019.
4. D.T. Lammers, J.M. Williams, J.R. Conner, E. Baird, O. Rokayak, J. McClellan, and M.J. Eckert, "Airborne UAV delivery of blood products and medical logistics for combat zones," *Transfusion (Philadelphia)*, 63 (S3), 2023, DOI: 10.1111/trf.17329.
5. J. A. Aker, „How drones will transform battlefield medicine, save lives,” Available: <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3095337/how-drones-will-transform-battlefield-medicine-save-lives/> (accessed 02.02.2024).
6. N.B. Roberts, E. Ager, T. Leith, I. Lott, M. Mason-Maready, T. Nix, A. Gottula, N. Hunt, and Ch. Brent, "Current Summary of the Evidence in Drone-Based Emergency Medical Services Care," *Resuscitation Plus*, 13, 100347, 2023.
7. Y. Yanagawa, "Using a Doctor Helicopter to Transport Medical Staff Only Without Air Evacuation for an Intoxicated Patient to Ensure Aviation Safety," *Air Medical Journal*, 37(4), 2018, DOI: 10.1016/j.amj.2018.04.005.
8. N. K. Das, R. Patil, S. Prasanna, P. Das, and S. Mukhida, "Drones for Medical Supply During Disaster: A Game Changer in "Health for All" Policy," *Health Services Insights*, 16, 2023, DOI: 10.1177/11786329231160013.
9. Spencer, "Lung Ventilator Spencer 190 NXT," Available: <https://www.spencer.it/en/emergency-rescue-equipment/resuscitation/ventilators/spencer-190-nxt> (accessed 02.02.2024).
10. J. Lewitowicz, *Podstawy eksploatacji statków powietrznych* (The basics of aircraft operation), Vol. 3: *Systemy eksploatacji statków powietrznych*, Warsaw: ITWL, 2006.
11. J. Lewitowicz, K. Kustroń, *Podstawy eksploatacji statków powietrznych* (The basics of aircraft operation), Vol. 2: *Własności i właściwości eksploatacyjne statku powietrznego*, Warsaw: ITWL, 2003.
12. Rotron Power, „Rotron Engine Applications,” [https://youtu.be/Kvmr\\_fyvKY?feature=shared](https://youtu.be/Kvmr_fyvKY?feature=shared), (accessed 02.02.2024).
13. J. Manerowski, R. Rządkowski, M. Kowalski, and R. Szczepanik, "Multimode Tip-Timing Analysis of Steam Turbine Rotor Blades," *IEEE Sensors Journal*, Volume 23, Issue 11, 2023, DOI: 10.1109/JSEN.2023.3239221.

14. R. Rządkowski, L. Kubitz, M. Maziarz, P. Troka, K. Dominiczak, and R. Szczepanik, "Tip-Timing Measurements and Numerical Analysis of Last-Stage Steam Turbine Mistuned Bladed Disc During Run-Down," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 8(3), pp. 409÷415, 2020.
15. P. Kowaleczko, R. Rządkowski, L. Kubitz, P. Kowaleczko, R. Szczepanik, and P. Troka, "New blade tip-timing system for measuring rotor blade vibration of steam and gas turbines," *Research & Development in Power Engineering*, E3S Web of Conferences 137, 2019, doi.org/10.1051/e3sconf/201913701040.
16. R. Rządkowski, E. Rokicki, L. Piechowski, and R. Szczepanik, "Analysis of middle bearing failure in rotor jet engine using tip-timing and tip-clearance techniques," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76-77, pp. 213÷227, 2016.
17. A. Gębura, H. Kowalczyk, T. Tokarski, S. Klimaszewski, K. Handzel, and F. Zgrzywa, "Monitoring of helicopters swash-plate wear using the FAM-C diagnosis method," *Diagnostyka*, 23(1), pp. 1÷12, 2022.
18. M. Zieja, A. Gębura, A. Szelmanowski, and B. Głowczyk, "Non-invasive monitoring of the technical condition of power units using the FAM-C and FDM-A electrical methods," *Sustainability*, MDPI, 13(23), 2021, DOI 10.3390/su132313329.
19. S. Augustyn and A. Gębura, "Capabilities of the FAM-C method to diagnose the accessory gearboxes and transmission-train assemblies of the Mi-24 helicopters," *Research Works of Air Force Institute of Technology*, 30(1), pp. 177÷186, 2012.
20. A. Gębura, "Diagnosing turbine engine bearing structures with the aid of FAM-C and FDM-A methods," *Polish Maritime Research*, 16(1), pp. 53÷60, 2009.
21. A. Pazur, "Testing the reliability of communication systems based on a specialized communication server," PhD Thesis, Air Force Institute of Technology, Warsaw, 2010.
22. A. Pazur and A. Szelmanowski, "AFIT's laboratory test equipment to optimize the integrated communication systems for polish military helicopters," Presented at: Benevento, Italy, IEEE International Workshop on "Metrology for Aerospace", 2014.
23. R.E. Barlow and F. Proschan, *Statistical theory of reliability and testing probability models*, New York, Holt, Rienhart and Wilson, 1975.
24. L. Knopik, K. Migawa, and A. Wdzięczny, "Profit optimization in maintenance system," *Polish Maritime Research*, 1(89), pp. 193÷198, 2016.
25. K. Flemons, "The use of drones for the delivery of diagnostic test kits and medical supplies to remote nations communities during Covid-19," *American Journal of Infection Control*, 50, 2022, DOI: 10.1016/j.ajic.2022.03.004.
26. A. A. Zailani, R. Z. Sabudin, R. A. Rahman, I. M. Saiboon, A. Ismail, and Z. Mahdy, "Drone for medical products transportation in maternal healthcare," *Medicine (Baltimore)*, 99(36), e21967, 2020, DOI: 10.1097/MD.00000000000021967.