

Justyna TOMASZEWSKA¹, Jan BARAŃSKI¹, Tomasz ZIENKIEWICZ¹,
Marek IWANIUK², Bartłomiej KURZYK²

¹Military University of Aviation (Lotnicza Akademia Wojskowa)

²Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

RELIABILITY DETERMINATION OF NANOELECTRONIC DEVICES USING SEMI-MARCOV PROCESSES

Wyznaczanie niezawodności układów nanoskopowych przy użyciu procesów półmarkowowskich

Abstract: *The main purpose of the article is to investigate the reliability process of nanoelectronics devices. Firstly, the research problem is presented based on foreign data source. Then, the analytical method has been chosen – semi-Marcov processes. Next, according to the adopted method and input data, the operating process has been analyzed. Finally, the probabilities of objects being in particular operating states, e.g. in the state of failure-free operation have been determined.*

Keywords: reliability, nanoelectronics devices, SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), analysis, probability

Streszczenie *W artykule badany jest proces niezawodności urządzeń nanoelektronicznych. Na początku przedstawiono problem badawczy, w oparciu o zagraniczne źródła danych. Następnie dobrano metodę analityczną – procesy półmarkowowskie. W kolejnej części, bazując na przyjętej metodzie i danych wejściowych, przeanalizowano proces eksploatacji, wyznaczając prawdopodobieństwa przebywania obiektów w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, np. w stanie bezawaryjnej pracy.*

Słowa kluczowe: niezawodność, urządzenia nanoelektroniczne, SQUID, analiza, prawdopodobieństwo

1. Introduction

Modern, microscopic electronic devices based on quantum phenomena exist and are becoming widely popular in various applications, including recently designed ones. Examples are vector and scalar magnetometers, directional antennas based on low and high temperature SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) magnetometers [2, 3, 8] and ultra-sensitive photodetectors [1, 4, 7].

The aim of the publication is to discuss the process of operation of nanoelectronics devices, which could potentially be used on the aircrafts. A model of transmitter operation will be constructed for data derived from the operation process of analogous devices and a statistical aircraft [5, 6]. In order to maintain uniform reliability and readiness for flight of the aircraft, the transient courses of the operation process are analysed. We determine the probabilities of objects in particular states of operation, assuming constant intensity of transitions between the states. Interesting issue is the moments of reaching the limit probabilities.

2. SQUID based antennas

Microscopic devices such as semiconductor photodetectors with a size of several micrometers are widely used in aviation now a days. A step into the future is the use of smaller and more sensitive devices and the search for their new functionalities. The whole class of modern devices such as electrometers, memory units, or radiation detectors are build using single electron transistor (SET) [7,9] or multilayer systems where quantum tunneling effect plays an important role. The theory of such devices is an area of interest for spintronics, which differs from traditional electronics by the fact that in addition to the electron charge, spins are used as an additional degree of freedom of the system. Using this property allows to increase the efficiency of data storage and transfer of information. Spintronic systems are particularly interesting for magnetic measurements, calculations carried out on quantum computers or quantum computer simulators, which is a modern technology dynamically developed in the world as part of the Second Quantum Revolution. Such systems are characterized by small dimensions, high work efficiency and minimal energy consumption. The extraordinary sensitivity of these transistors on changes in the gate voltages makes SET an ultra-sensitive electrometer [7]. Experimental realizations show that SET-based systems are also able to detect very weak infrared radiation [4], microwaves as well as radio waves [1]. The resolution of this type of devices is orders of magnitude higher than those used so far. Antennas, transmitters and sensors based on nanoscopic technology seem to be the future of modern avionics.

In this paper, the reliability analysis of airborne micro-devices containing superconductive elements will be obtained. The main applications of superconductors include SQUID type magnetometers. The current market offers a wide range of these

devices. Direct (DC) and alternating current (AC), low and high temperature, scalar and vector sensors are available at the market [12, 13]. Review of the current state of knowledge on the development and application of SQUID nanoscopic systems as well as photos of such systems taken with the STM tunnel microscope are presented in [7].

SQUID-based systems are tested for use as non-invasive microfracture testers in landing gear, wheels and fuselages. Such magnetometers are also considered as receivers in a system of directional antennas. One solution for such antennas assumes that by measuring the phase difference of the signal reaching at least two sensors the difference of optical paths can be estimated. As a result, it is possible to determine the angle between the incoming beam and the line determined by the sensors. Thanks to the system of such antennas it is possible to determine the direction from which the signal is coming AOA (Angle of Arrival).

The classical superconductors of which the first SQUID interferometers were made become superconductive at cryogenic temperatures (below 10 K). The transition temperature for the most commonly used Nb is 9.2 K. Such devices must be cooled with liquid helium (boiling point 4.2 K). The discovery of high-temperature superconductors gave rise to a new class of superconductive interferometers. The most commonly used alloys such as copperates YBaCuO (yttrium, barium, cooper, oxide) reach critical temperatures of 100 K. This means that instead of expensive and difficult to store helium, much cheaper liquid nitrogen (77.4 K) can be used as a cooling substrate. Early high temperature SQUIDs had a much lower sensitivity and a higher noise current than the classic ones. Modern technology allows to create high-temperature SQUIDs with performance comparable to those made of classic superconductors. The problem of cooling in the case of stationary devices can be partially eliminated by using cryostats (Cryocooler), in such devices the coolant substance, e.g. helium, circulates in a closed circuit and is expanded adiabatically to cool down the superconducting coils. Thanks to the use of so-called Cryocoolers, the coolant does not have to be refilled to often. Such devices work well in a ground conditions but it would be problematic to install such large devices on an aircraft with sensors located in different parts of the aircraft. Therefore refilling of the coolant in on-board systems seems necessary.

Measurement of very weak magnetic fields encounters a number of barriers. Magnetometers, with sensitivity of the magnitude order of femtotesla, are exposed to magnetic fields from other sources (noises). The intensities of this noises are usually orders of magnitude higher than the signal intensity. The disturbing factors include the Earth's magnetic field of the order of 50 microtesla [14], or electrical devices only a few meters away from the sensor. Gradiometry enables differential magnetic field measurement. For this purpose a system of at least two sensors at a fixed distance shall be used. The output signal is the difference between the measured field strengths. In this way, fixed or slow-changing signal components are eliminated. In the case of SQUID magnetometers, the first order gradiometer is composed of two superconducting coils. Higher order gradiometers are capable of differentiating the higher order gradients of magnetic fields. This technique

works especially well when a weak source of fast changing magnetic field is disturbed by much stronger but slow varying magnetic fields.

Modern magnetometers such as low-temperature SQUID can measure magnetic flux changes with an accuracy of up to millionths of a single magnetic flux quanta ($\varphi_0 \sim 2 \cdot 10^{-15}$ Wb). However, apart of the requirement for high sensitivity, high dynamics of the measured range is often necessary. In practice, this means that we not only want to measure ultra-small fields, but also be able to measure larger fields with very high precision. Such a requirement appears to be extremely important for considered application. A beam of radiation falling acting on a sensor usually gives flux much greater than single flux quanta, but only by examining a very subtle difference in field strength at different points in the aircraft gives an insight into the direction from which it is incoming. In the case of SQUID interferometers, this dynamic resolution is achieved by a "flux-locked loop". In this technology, the output voltage, which is a periodic function of the magnetic field flux, is amplified and transferred to a coil near SQUID. The coil induces a flux of opposite polarity to the one directly measured. In this way the interferometer is effectively closed in the zero magnetic field zone. Other differential systems also allow for the elimination of noise with repeatable characteristics.

In this work the operation process of SQUID magnetometers will be analyzed. The main assumption done in this work is that the device must be periodically refilled with cooling fluid.

3. Reliability analysis of nanoscopic systems

An essential element determining whether a device is suitable for use is its reliability. At the moment there are no SQUID antennas installed on aircraft. However, knowledge of the requirements for SQUID-based equipment and the actual aircraft operation process allows to determine the reliability of the used modules. In the work it was assumed that a module which has broken down is replaced with a new one and the defective element is repaired, but this does not affect the readiness of the aircraft to perform the aviation task.

3.1. Semi-Marcov processes

One of the analytical methods based on the analysis of random processes is the semi-Marcov process method. It is based on the assumption that being of a technical object in different states is a random variable. The calculation of probabilities can be performed with the use of Matematica. To maintain an even readiness for use indicator, it is assumed that the averaged modulus may be in one of the operating states:

S1 - *Operations (active)* - is the state where equipment is used.

S2 - *Cooling* - resembles the state of a short term service required to maintain the conditions necessary for a proper work of a module.

S3 - *Short-term failure* - is a state where short term module break down is caused by temporary/spontaneous change of a conditions such as small voltage supertension or temperature fluctuations. This state can eventually lead to persistent error in working process of a module (S4) or return to normal operation state (S1) after a short period of time.

S4 - *Long-term failure* - is a serious and persistent failure of a module. If module is at this state it should be replaced or repaired in laboratory conditions.

If we assume that at a given time the device was in one of the states, e.g. "cooling" state (state S_i), then from this state it can jump to another state, e.g. to the "active" state (S_j). The time of staying in the state S_i until the transition to the state S_j is a random variable and it has arbitrary distribution described by the $G_{ij}(t)$ distribution function. The transition from the state i to the state j occurs with the probability $p_{ij} > 0$ (with $\sum_{ij} p = 1$). If afterwards the device from state S_j will be transmitted to the state S_k , the time of staying in state S_j will be a random variable with arbitrary distribution of the continuous type described on the positive semi-axis represented by the $G_{jk}(t)$ [10] distribution, and so on.

The probability of transition from the state S_i to the state S_j ($i \neq j$) in the interval of time Δt for the semi-brand process is determined by the relation [11]:

$$p_{ij}(t, t + \Delta t) = F_{ij}(t + \Delta t)\Pi_{ij},$$

where:

$F_{ij}(t) = P\{\Theta_{ij} < t\}$ - the process residence time distribution in the state S_i provided that the next state is S_j ,

Π_{ij} - conditional probabilities of the Markov string inserted into the process (probabilities of jumping to the state S_j when the process leaves the state S_i) [3],

Θ_{ij} - a random variable of the process residence time in the state S_i provided that the next state is S_j .

3.2. Model of operating states

In this article, the model of operating states of the transmitter presented in the form of a directed graph (fig. 1) will be considered.

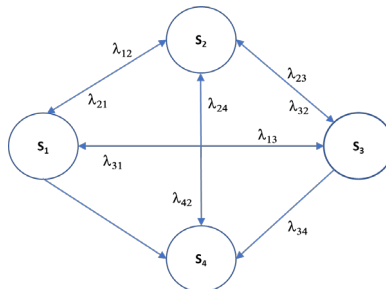


Fig. 1. The graph of permitted transitions

The system shown in fig. 1 can be described by a system of differential equations Kolmogorov [10]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{41}P_4(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{32}P_3(t) + \lambda_{42}P_4(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34})P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{43}P_4(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= -(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43})P_4(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t) \end{aligned}$$

where the following symbols indicate probabilities of being in a given state:

- $P_1(t)$ – „operations”;
- $P_2(t)$ – „cooling”;
- $P_3(t)$ – „short term failure”;
- $P_4(t)$ – „long term failure”.

λ_{ij} – intensity of transition from state i to state j , expressed by frequency of transitions per hour., $(i, j) \in \{1,2,3,4\}$.

The transition matrix is defined as follows [11]:

$$\frac{d}{dt}P(t) = \Lambda P(t)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) & \lambda_{21} & \lambda_{31} & \lambda_{41} \\ \lambda_{12} & -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) & \lambda_{32} & \lambda_{42} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & -(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}) & \lambda_{43} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & -(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43}) \end{bmatrix}$$

Table 1 shows the matrix of permitted transitions between the individual states for the operational process.

Table 1

Matrix of permitted transitions

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
S ₁	0	1	1	1
S ₂	1	0	1	1
S ₃	1	0	0	1
S ₄	0	1	0	0

Table 2 is presented the intensity of transition between the individual states for the operational process.

Table 2

The intensity of the transition between the analyzed operational states $[\frac{1}{h}]$

λ_{ij}	S1	S2	S3	S4
S ₁	-1,0000	0,8545	0,1408	0,0047
S ₂	0,9249	-1,0000	0,0704	0,0047
S ₃	5,9718	0,0000	-6,0000	0,0282
S ₄	0,0000	0,0014	0,0000	-0,0014

3.3. Calculation of the probabilities by using semi-Markov process

In current analysis, the probability of being in a given state as a function of time has been calculated¹. This dependency is strictly connected with the initial conditions in which the object was at the beginning of observation [10]. The obtained probabilities for particular states, assuming as initial conditions of "cooling", in function of time are shown in figs. 2-5.

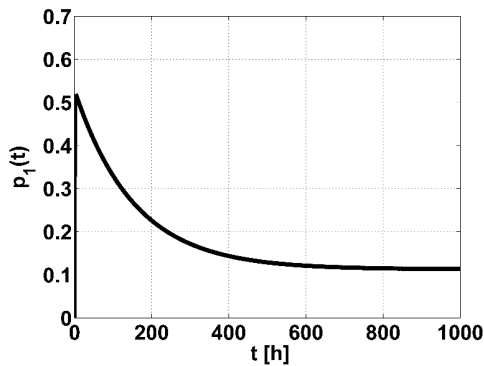


Fig. 2. The probability of being module in the state "active", assuming the initial state was cooling. It has been assumed that the object is always repairable

¹ The calculations were made in Matlab program, where the solution of the system was a combination of the exponential functions with constant factors.

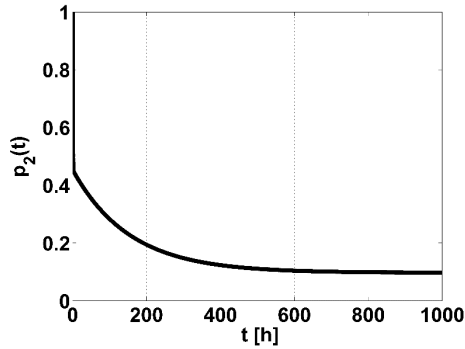


Fig. 3. The probability of being module in the state "cooling", assuming the initial state was cooling. It has been assumed that the object is always repairable

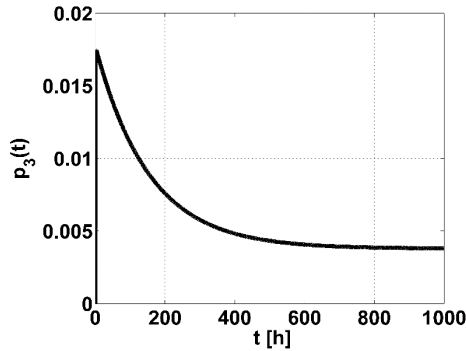


Fig. 4. The probability of being module in the state "short term failure", assuming the initial state was cooling. It has been assumed that the object is always repairable

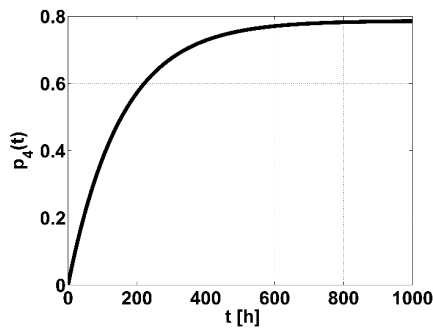


Fig. 5. The probability of being module in the state "long term failure", assuming the initial state was cooling. It has been assumed that the object is always repairable

Based on figs. 2-5, it can be concluded how the probability of being in different operating states as a function of time changes. Approximately 600 hours after the module is put into operation, the probability reaches its limits.

4. Summary

Semi-Markov processes, with fulfilled assumptions, allow to determine the probabilities of the condition of the analyzed technical object in the considered period of time. The conducted analysis explains how the exploitation process proceeds without taking into account special prophylactic procedures. After the lapse of time, it turns out that the technical object is aiming at the state of long-term failure. In practice, after the introduction of properly designed and supervised by the flight safety management system, the failure of the transmitter will not affect flight safety.

Presented results have not been experimentally verified, due to the fact lack of such devices in Polish Air Force.

Acknowledgment

The research has been conducted in the framework of the project implemented in 2018–2021, entitled “Analysis of nanoscopic systems coupled with superconductors in the context of quantum information processing” no. GB/5/2018/209/2018/DA funded by the Ministry of National Defence, Republic of Poland.

5. References

1. Aassime A., Delsing P., Claeson T.: A sensitive and fast radio frequency single-electron transistor. *Nanotechnology* 12 96, 2001.
2. Abeita P.: *Superconducting Quantum Interference Devices for the Detection of Magnetic Flux and Application to Airborne High Frequency Direction Finding*, Theses and Dissertations, 2015.
3. Archer M.D.: *High Frequency Magnetic Field Direction Finding Using MGL-S8A B-dot Sensors*. Theses and Dissertations, 850, 2013.
4. Astafiev A., Antonov V., Kutsuwa T., Komiyama S.: Single electron transistors as far-infrared photon detectors, Device Research Conference. Conference Digest (Cat. No.01TH8561), Notre Dame, IN, USA, 2001, DOI 10.1109/DRC.2001.937907.
5. Kharat D.K., Muthurajan H., Praveenkumar B.: *Present and Futuristic Military Applications of Nanodevices*”, *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 36:2, 231-235, 2006.
6. Kvasager T.K.: *Superconducting Quantum Interference Device Array Based High Frequency Direction Finding on an Airborne Platform*". Theses and Dissertations, 2016.
7. Kumar O., Kaur M.: Single electron transistor: Applications & problems, *International journal of VLSI design & Communication Systems (VLSICS)*, Vol.1, No.4, 2010.
8. Martínez-Pérez M. J., Koelle D., *NanoSQUIDS: Basics & recent advances Physical Sciences Reviews* 2, 20175001, 2017.

9. Wu C.S.: Coupled single-electron transistors as a differential voltage amplifier. *New J. Phys*, 8, 300, 2006.
10. Zieja M., Ważny M., Jaształ M., Stępień S.: Estimation of Reliability for Aircraft Systems as Regards the Impact of Destructive Ageing Processes, Conference: Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL), 2019.
11. Żurek J., Zieja M., Ziółkowski J., Borucka A.: Vehicle Operation Process Analysis using the Markov Processes, Conference: Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL), 2019.
12. <https://starcryo.com/>
13. <http://www.supracon.com/en/squid.html>
14. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>

WYZNACZANIE NIEZAWODNOŚCI UKŁADÓW NANOSKOPOWYCH PRZY UŻYCIU PROCESÓW PÓLMARKOWOWSKICH

1. Wprowadzenie

Nowoczesne, mikroskopijne urządzenia elektroniczne oparte na zjawiskach kwantowych istnieją i cieszą się coraz większym zainteresowaniem w różnych aplikacjach, w tym nowo projektowanych. Przykładem są magnetometry wektorowe i skalarne, anteny kierunkowe oparte na nisko- i wysokotemperaturowych magnetometrach SQUID (ang. Superconducting Quantum Interference Device) [2, 3, 8] i ultraczułe fotodetektory [1, 4, 7].

W artykule zostanie zbadany i omówiony prognozowany proces eksploatacji nadprzewodzących urządzeń nanoelektronicznych, które mogą zostać zastosowane w samolotach użytkowanych w Siłach Zbrojnych RP [5, 6]. W celu utrzymania równomiernego wskaźnika niezawodności i gotowości do lotu samolotów, analizuje się przebiegi przejściowe procesu eksploatacji, wyznaczając prawdopodobieństwa przebywania obiektów w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, przy założeniu stałych intensywności przejść między stanami. Interesującym zagadnieniem są momenty osiągnięcia prawdopodobieństw granicznych.

2. Obiekt badań

Współcześnie mikroskopowe urządzenia takie jak fotodetektory półprzewodnikowe o rozmiarach kilku mikrometrów są szeroko wykorzystywane w lotnictwie. Krokiem w przyszłość jest wykorzystanie coraz mniejszych i czulszych urządzeń oraz poszukiwanie ich nowych funkcjonalności. Cała klasa nowoczesnych urządzeń takich jak elektrometry, jednostki pamięci czy czujniki promieniowania jest oparta na tranzystorach jednoelektronowych (SET – ang. single electron transistor) [7, 9] oraz właściwościach struktur wielowarstwowych, w których występują efekty tunelowe. Teoria działania takich urządzeń jest obszarem zainteresowania spintroniki, która różni się od tradycyjnej elektroniki tym, że spiny elektronów wykorzystywane są jako dodatkowy stopień swobody układu, co m.in. umożliwia zwiększenie wydajności przechowywania i przesyłania danych. Systemy spintroniczne są szczególnie interesujące dla pomiarów magnetycznych, obliczeń realizo-

wanych na komputerach kwantowych lub symulatorach komputerów kwantowych – nowoczesnej technologii dynamicznie rozwijanej na świecie w ramach drugiej rewolucji kwantowej. Układy tego typu charakteryzują się małymi rozmiarami, wysoką wydajnością pracy oraz minimalnym zużyciem energii. Niezwykła czułość tranzystorów SET na zmiany napięć bramkujących powoduje, że są one ultraczułymi elektrometrami [7]. Eksperymentalne realizacje pokazują, że układy oparte na SET są również w stanie wykryć bardzo słabe promieniowanie podczerwone [4], mikrofalowe, jak również fale radiowe [1]. Rozdzielczość tego typu urządzeń jest rzędy wielkości większa niż dotychczas stosowanych. Anteny, transmitery oraz czujniki oparte na technologii nanoskopowej wydają się przyszłością w nowoczesnej awionice.

W tej pracy skupiono się na analizie niezawodności pokładowych mikrourządzeń zawierających elementy nadprzewodzące. Do głównych zastosowań nadprzewodników zaliczają się magnetometry typu SQUID. Rynek oferuje współcześnie szeroką gamę tych urządzeń. Dostępne są czujniki stało- i zmiennoprądowe, nisko- i wysokotemperaturowe, skalarne oraz wektorowe [12, 13]. Przegląd aktualnego stanu wiedzy z zakresu wytwarzania i zastosowania nanoskopowych układów SQUID, jak również zdjęcia tego typu układów wykonane mikroskopem tunelowym STM zostały przedstawione w pracy [7].

Układy oparte na SQUID są badane pod kątem wykorzystania jako nieinwazyjne testery mikropęknięć w podwoziach, kołach oraz kadłubach samolotów. Tego typu magnetometry rozważa się również jako odbiorniki w układzie anten kierunkowych. Jedno z rozwiązań zakłada, że poprzez pomiar różnicy faz sygnału dochodzącego do co najmniej dwóch czujników szacuje się różnicę dróg optycznych. Co za tym idzie, możliwe jest określenie kąta, jaki tworzy nadchodząca wiązka z prostą wyznaczoną przez czujniki. Dzięki systemowi takich anten można określić kierunek, z którego nadchodzi sygnał AOA (ang. Angle of Arrival).

Klasyczne nadprzewodniki, z których wykonane były pierwsze interferometry SQUID, przechodzą w stan nadprzewodzący w temperaturach kriogenicznych (poniżej 10 K). Temperatura przejścia dla najczęściej stosowanego niobu wynosi 9.2 K. Takie urządzenia należy chłodzić ciekłym helem (o temperaturze wrzenia 4.2 K). Odkrycie nadprzewodników wysokotemperaturowych dało początek nowej klasie interferometrów nadprzewodzących. Najczęściej wykorzystywane stopy takie jak miedziany YBaCuO (yttrium, barium, cooper, oxide) osiągają temperatury krytyczne rzędu 100 K. Dzięki temu zamiast drogiego i trudnego w przechowywaniu helu, jako chłodziwo można wykorzystywać znacznie tańszy ciekły azot (temp. 77.4 K). Wczesne, wysokotemperaturowe SQUID posiadały znacznie mniejszą czułość oraz większy prąd szumu w stosunku do klasycznych. Współczesna technologia pozwala tworzyć wysokotemperaturowe SQUID nieodbiegające znacznie wydajnością od tych zbudowanych z klasycznych nadprzewodników. Problem chłodzenia w przypadku urządzeń stacjonarnych może być zniwelowany przez stosowanie kriostatów (*cryocooler*), w których substancja czynna, np. hel, krąży w obiegu zamkniętym i jest rozprężana adiabatycznie, chłodząc urządzenie. Dzięki zastosowaniu tzw. *cryocoolerów* substancja chłodząca nie musi być często uzupełniana. Takie urządzenia sprawdzają się jednak w warunkach naziemnych. Montaż tak dużych

urządzeń na statku powietrznym z czujnikami umieszczonymi w różnych miejscach samolotu byłby problematyczny. Uzupełnianie chłodziwa w systemach pokładowych wydaje się zatem konieczne.

Pomiar bardzo słabych pól magnetycznych napotyka na szereg barier. Magnetometry o czułości rzędu femtotesli narażone są na działanie pól magnetycznych pochodzących z innych źródeł (szumów), których natężenia są rzędy wielkości większe niż natężenie sygnału badanego obiektu. Do czynników zaburzających należy zaliczyć choćby pole magnetyczne Ziemi o natężeniu rzędu 50 mikrottesli [14], czy urządzenia elektryczne odległe zaledwie kilka metrów od czujnika. Gradiometria umożliwia różnicowy pomiar pola magnetycznego. W tym celu stosuje się układ co najmniej dwóch czujników w ustalonej odległości. Sygnał wyjściowy stanowi różnicę między zmierzonymi natężeniami pola. W ten sposób eliminuje się stałe lub wolnozmiennie składniki sygnału. W przypadku magnetometrów SQUID gradiometr pierwszego rzędu jest złożony z dwóch cewek nadprzewodzących. Stosuje się również gradiometry wyższych rzędów zdolnych do różnicowania pochodnych pola wyższych rzędów. Technika ta szczególnie dobrze sprawdza się, kiedy słabe źródło szybkozmiennego pola magnetycznego jest zakłócanie przez znacznie silniejsze, ale wolnozmiennie pola magnetyczne.

Nowoczesne magnetometry, takie jak SQUID niskotemperaturowe mogą mierzyć zmiany strumienia magnetycznego z dokładnością dochodzącą do milionowych części pojedynczego kwantu strumienia magnetycznego ($\varphi_0 \sim 2 \cdot 10^{-15}$ Wb), ale poza wymaganiami wysokiej czułości, często wymagana jest również duża dynamika mierzonego zakresu. W praktyce oznacza to, że nie tylko chcemy mierzyć ultra małe pola, ale również być w stanie zmierzyć większe pola z bardzo dużą precyzją. Taki wymóg wydaje się niezwykle istotny z punktu widzenia rozpatrywanego zastosowania. Wiązka promieniowania padająca na statek może dawać strumień znacznie przekraczający 1 flux, ale dopiero wychwycenie bardzo subtelnej różnicy w natężeniu pola w różnych miejscach samolotu daje wgląd w kierunek, z którego nadchodzi. W przypadku interferometrów SQUID taką dynamiczną rozdzielczość otrzymuje się dzięki pętli sprzężenia zwrotnego „flux-locked loop”. W tej technice napięcie wyjściowe będące periodyczną funkcją strumienia pola magnetycznego jest wzmacniane i podawane na cewkę w pobliżu SQUID. Cewka indukuje strumień o polaryzacji przeciwnej do bezpośrednio mierzonego. W ten sposób interferometr efektywnie jest zamknięty w strefie zerowego pola magnetycznego. Inne systemy różnicujące pozwalają również na wyeliminowanie szumów o powtarzalnej charakterystyce.

W tej pracy zostanie przeanalizowany proces eksploatacji magnetometrów SQUID przy założeniu, że urządzenie musi być okresowo uzupełnione o czynnik chłodzący.

3. Analiza niezawodnościowa układów nanoskopowych

Istotnym elementem decydującym o tym, czy dane urządzenie nadaje się do eksploatacji, czy też nie, jest jego niezawodność. Obecnie na statkach powietrznych nie ma

zainstalowanych anten opartych na technologii SQUID. Jednak znajomość wymagań stawianych urządzeniom zbudowanym na bazie SQUID oraz rzeczywistego procesu eksploatacji statków powietrznych pozwala na wyznaczenie niezawodności modułów je wykorzystujących. W pracy przyjęto, że moduł, który uległ awarii, jest wymieniany na nowy, a uszkodzony element ulega naprawie. Nie ma to jednak wpływu na gotowość statku powietrznego do wykonania zadania lotniczego.

3.1. Procesy półmarkowskie

Jedną z metod analitycznych opartych na analizie procesów losowych jest metoda procesów półmarkowskich (semi-Markowa). Bazuje ona na przyjęciu założenia, że przebywanie obiektu technicznego w różnych stanach jest zmienną losową. Wyznaczenie prawdopodobieństw można wykonać przy użyciu programu Mathematica. Ze względu na utrzymanie równomiernego wskaźnika gotowości do użycia, zakłada się, że uśredniony rozpatrywany moduł może przebywać w jednym ze stanów eksploatacyjnych:

- S1 - *działanie* – jest stanem w którym urządzenie jest używane;
- S2 - *schładzanie* – opisuje stan krótkotrwałego serwisowania potrzebnego, by utrzymać warunki poprawnej pracy urządzenia;
- S3 - *awaria krótkotrwała* – jest stanem krótkotrwałego błędnego działania urządzenia. Taki stan może nastąpić ze względu na chwilowe wahania warunków pracy, takich jak przepięcia lub wahania temperatury. Stan ten może prowadzić do długotrwałej awarii (S4) lub usterka może ustać samoczynnie powracając do stanu działania (S1);
- S4 - *awaria długotrwała* – jest stanem poważnego/trwałego uszkodzenia modułu. Jeśli moduł znajdzie się w tym stanie, powinien zostać wymieniony lub oddany do naprawy w warunkach laboratoryjnych.

Jeżeli założyć, że w danym momencie czasu urządzenie znajdowało się w jednym ze stanów, np. w stanie „schładzanie” (stan S_i), to z tego stanu może przejść skokowo do innego stanu, np. do stanu „działania” (S_j). Czas przebywania w stanie S_i do przejścia do stanu S_j jest zmienną losową o dowolnym rozkładzie opisywanym przez dystrybucję $G_{ij}(t)$ [10].

Przejście ze stanu i do stanu j zachodzi z prawdopodobieństwem $p_{ij} > 0$ (przy czym $\sum_{ij} p = 1$).

Jeżeli dalej nastąpi przejście ze stanu S_j do stanu S_k , to czas przebywania w stanie S_j jest zmienną losową o dowolnym rozkładzie typu ciągłego opisanym na dodatniej półosi opisywanym dystrybucją $G_{jk}(t)$ itd.

Prawdopodobieństwa przejścia ze stanu S_i do stanu S_j ($i \neq j$) w przedziale czasu Δt dla procesu semi-Markowa określone jest zależnością [11]:

$$p_{ij}(t, t + \Delta t) = F_{ij}(t + \Delta t) \Pi_{ij},$$

gdzie:

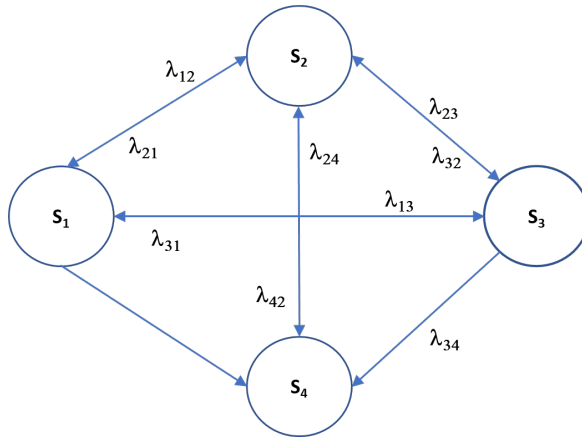
$F_{ij}(t) = P\{\theta_{ij} < t\}$ – dystrybuanta czasu przebywania procesu w stanie S_i , pod warunkiem że następnym stanem będzie S_j ,

Π_{ij} – warunkowe prawdopodobieństwa włożonego w proces łańcucha Markowa (prawdopodobieństwa przejścia skokowego do stanu S_j przy wyjściu procesu ze stanu S_i) [3],

θ_{ij} – zmienna losowa czasu przebywania procesu w stanie S_i , pod warunkiem że następnym stanem będzie S_j .

3.2. Model stanów eksploatacyjnych

W niniejszej pracy zajmiemy się modelem stanów eksploatacji nadajnika przedstawionym w postaci grafu skierowanego (rys. 1).



Rys. 1. Graf przejść dozwolonych

System przedstawiony na rys. 1 może być opisany układem równań różniczkowych Kolmogorowa [10]:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{41}P_4(t)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{32}P_3(t) + \lambda_{42}P_4(t)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34})P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{43}P_4(t)$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = -(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43})P_4(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t)$$

gdzie poniższe symbole oznaczają prawdopodobieństwa:

- $P_1(t)$ – przebywania systemu w stanie „działanie”;
- $P_2(t)$ – przebywania systemu w stanie „schładzanie”;
- $P_3(t)$ – przebywania systemu w stanie „awaria krótkotrwała”;
- $P_4(t)$ – przebywania systemu w stanie „awaria długotrwała”.

λ_{ij} – intensywność przejścia ze stanu i do stanu j , wyrażona częstością przejść na godz., $(i, j) \in \{1, 2, 3, 4\}$.

Zapis macierzowy jest następujący [11]:

$$\frac{d}{dt}P(t) = \Lambda P(t)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) & \lambda_{21} & \lambda_{31} & \lambda_{41} \\ \lambda_{12} & -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) & \lambda_{32} & \lambda_{42} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & -(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}) & \lambda_{43} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & -(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43}) \end{bmatrix}$$

Używając przekształcenia Laplace’a, uzyskano układ równań w postaci:

$$sP_1(t) - P_1(0) = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{41}P_4(t)$$

$$P_2(t) - P_2(0) = -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{32}P_3(t) + \lambda_{42}P_4(t)$$

$$sP_3(t) - P_3(0) = -(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34})P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{43}P_4(t)$$

$$sP_4(t) - P_4(0) = -(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43})P_4(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t)$$

W tabeli 1 przedstawiono macierz przejść dozwolonych pomiędzy poszczególnymi stanami dla rzeczywistego procesu eksploatacji.

Tabela 1

Macierz przejść dozwolonych

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
S ₁	0	1	1	1
S ₂	1	0	1	1
S ₃	1	0	0	1
S ₄	0	1	0	0

W tabeli 2 zestawiono intensywność przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami dla rzeczywistego procesu eksploatacji

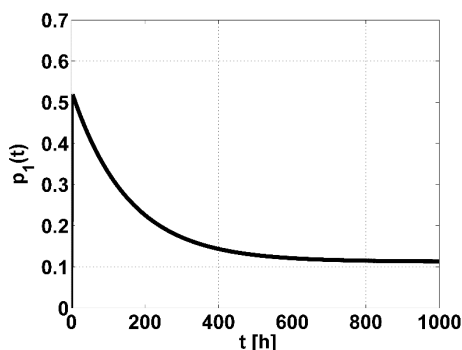
Tabela 2

Intensywność przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami eksploatacyjnymi [$\frac{1}{h}$]

λ_{ij}	S1	S2	S3	S4
S ₁	-1,0000	0,8545	0,1408	0,0047
S ₂	0,9249	-1,0000	0,0704	0,0047
S ₃	5,9718	0,0000	-6,0000	0,0282
S ₄	0,0000	0,0014	0,0000	-0,0014

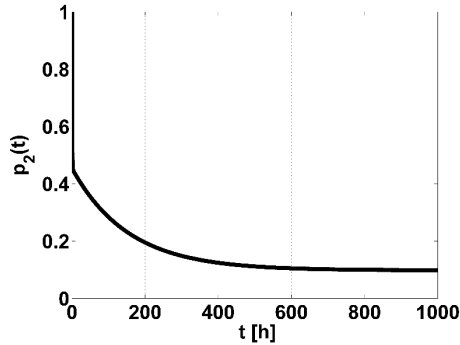
3.3. Wyznaczanie prawdopodobieństw granicznych w procesach półmarkowowskich

W niniejszej analizie policzono¹ zależność prawdopodobieństwa przebywania w danym stanie w funkcji czasu. Zależność ta jest ściśle powiązana z warunkami początkowymi, w jakich znajdował się nasz obiekt [10]. Otrzymane prawdopodobieństwa dla poszczególnych stanów, przy założeniu jako warunków początkowych stanu oczekiwania, w funkcji czasu przedstawiono na rys. 2–5.

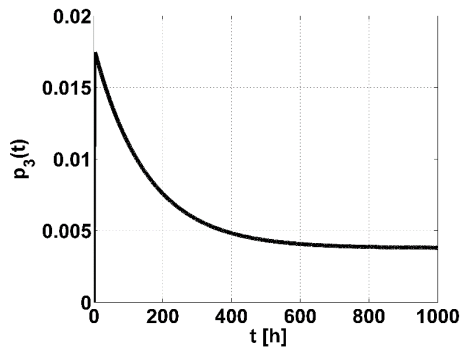


Rys. 2. Prawdopodobieństwo przebywania obiektu technicznego w stanie poprawnego działania, przy założeniu, że stanem początkowym był stan schładzania. Model zakłada, że obiekt jest zawsze naprawialny

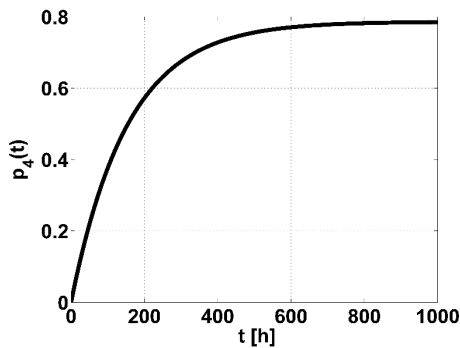
¹ Obliczeń dokonano w programie Matlab, jako rozwiązanie układu otrzymano kombinację funkcji eksponentialnych ze stałymi współczynnikami.



Rys. 3. Prawdopodobieństwo przebywania obiektu technicznego stanie schładzania, przy założeniu, że stanem początkowym był stan schładzania. Model zakłada, że obiekt jest zawsze naprawialny



Rys. 4. Prawdopodobieństwo przebywania obiektu technicznego stanie krótkotrwałej awarii, przy założeniu, że stanem początkowym był stan schładzania. Model zakłada, że obiekt jest zawsze naprawialny



Rys. 5. Prawdopodobieństwo przebywania obiektu technicznego stanie długotrwałej awarii, przy założeniu, że stanem początkowym był stan schładzania. Model zakłada, że obiekt jest zawsze naprawialny

Na podstawie rys. 2–5 można zauważyć, jak zmienia się prawdopodobieństwo przebywania w różnych stanach eksploatacyjnych w funkcji czasu. Po około 600 godzinach od wprowadzenia modułu do eksploatacji prawdopodobieństwo osiąga wartości graniczne.

4. Podsumowanie

Procesy semi-Markowa przy spełnionych założeniach pozwalają wyznaczać prawdopodobieństwa, w jakim stanie znajduje się analizowany obiekt techniczny w rozpatrywanym przedziale czasowym. Przeprowadzona analiza wyjaśnia, jak przebiega proces eksploatacji bez uwzględnienia specjalnych zabiegów profilaktycznych, gdy dominującym stanem okazuje się stan długotrwałej awarii. W praktyce po wprowadzeniu odpowiednio zaprojektowanych i nadzorowanych przez system zarządzania bezpieczeństwem lotów przedsięwzięć korygujących proces eksploatacji systemu po wymianie nadajnika pracującego na urządzeniach nanoskopowych rozpoczęłyby się od nowa.

Przedstawione w pracy wyniki nie zostały zweryfikowane eksperymentalnie, z powodu braku takich urządzeń w Polskich Siłach Powietrznych.

Podziękowanie

Pracę naukową wykonano w ramach realizacji projektu „Analysis of nanoscopic systems coupled with superconductors in the context of quantum information processing” Nr GB/5/2018/209/2018/DA finansowanego przez Ministerstwo Obrony Narodowej w latach 2018–2022.

5. Literatura

1. Aassime A., Delsing P., Claeson T.: A sensitive and fast radio frequency single-electron transistor. *Nanotechnology* 12 96, 2001.
2. Abeita P.: Superconducting Quantum Interference Devices for the Detection of Magnetic Flux and Application to Airborne High Frequency Direction Finding, *Theses and Dissertations*, 2015.
3. Archer M.D.: High Frequency Magnetic Field Direction Finding Using MGL-S8A B-dot Sensors. *Theses and Dissertations*, 850, 2013.
4. Astafiev A., Antonov V., Kutsuwa T., Komiyama S.: Single electron transistors as far-infrared photon detectors, *Device Research Conference. Conference Digest (Cat. No.01TH8561)*, Notre Dame, IN, USA, 2001, DOI 10.1109/DRC.2001.937907.
5. Kharat D.K., Muthurajan H., Praveenkumar B.: Present and Futuristic Military Applications of Nanodevices”, *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 36:2, 231-235, 2006.

6. Kvasager T.K.: Superconducting Quantum Interference Device Array Based High Frequency Direction Finding on an Airborne Platform". Theses and Dissertations, 2016.
7. Kumar O., Kaur M.: Single electron transistor: Applications & problems, International journal of VLSI design & Communication Systems (VLSICS), Vol.1, No.4, 2010.
8. Martínez-Pérez M. J, Koelle D., NanoSQUIDS: Basics & recent advances Physical Sciences Reviews 2, 20175001, 2017.
9. Wu C.S.: Coupled single-electron transistors as a differential voltage amplifier. New J. Phys, 8, 300, 2006.
10. Zieja M., Ważny M., Jaształ M., Stępień S.: Estimation of Reliability for Aircraft Systems as Regards the Impact of Destructive Ageing Processes, Conference: Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL), 2019.
11. Żurek J., Zieja M., Ziółkowski J., Borucka A.: Vehicle Operation Process Analysis using the Markov Processes, Conference: Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL), 2019.
12. <https://starcryo.com/>
13. <http://www.supracon.com/en/squid.html>
14. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>