

Waldemar Frankiewicz, Zbigniew Lewandowski, Michał Kuc
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zielonka

WPLYW ŚRODOWISKA ELEKTROMAGNETYCZNEGO NA PRACĘ NAPĘDU BLDC

ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT EFFECTS ON BLDC DRIVE

Streszczenie: W artykule zamieszczono najważniejsze informacje na temat możliwości potencjalnego wpływu środowiska elektromagnetycznego na eksploatację napędu BLDC. W szczególności zaprezentowane zostały wyniki badań odporności bezzałogowego statku powietrznego BSP z napędem BLDC na wyładowania elektryczności statycznej ESD wykonane w akredytowanym Laboratorium Badań Kompatybilności Elektromagnetycznej i Pomiarów Pól Elektromagnetycznych Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia. Omówiono zakres przeprowadzonych badań, uzyskane wyniki oraz wymagania normatywne w tym zakresie.

Abstract: The most important information regarding possibility of electromagnetic environment effects on BLDC drive operation were presented in this article. In particular, this paper presents tests results on the drone with BLDC power unit throughout ESD immunity tests performed in accredited Laboratory of Electromagnetic Compatibility Testing and Electromagnetic Field Measurements of the Military Institute of Armament Technology. This paper also covers range of performed tests, obtained results and standard requirements regarding this test range.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silniki BLDC, kompatybilność elektromagnetyczna, badania ESD
Keywords: electrical machines, BLDC motors, electromagnetic compatibility, ESD tests

1. Wstęp

Napędy BLDC w swej historii przeszły dość znaczny rozwój i różnorodność potencjalnych zastosowań. Pierwsze komercyjne napędy tego typu pojawiły się już we wczesnych latach 60-tych XX wieku. Jednak pomimo licznych zalet obszar ich działania był stosunkowo ograniczony. Powodem była stosunkowo niewielka moc i jednocześnie dość wysoki koszt. Sytuacja zmieniła się diametralnie wraz z wprowadzeniem magnesów neodymowych oraz wysokonapięciowych tranzystorów. Jednak dopiero spadek cen elektroniki sterującej dał szansę na wykorzystania posiadanego potencjału zalet tych silników. Z powszechnych aplikacji mikro napędów do automatyki, robotyki otworzyła się era aplikacji także i w środkach transportowych [1]. Napędy BLDC są jednocześnie jednymi z nielicznych napędów elektrycznych, które zasadniczo bez elektronicznych układów sterujących nie mogą właściwie pracować. Wieloletnie doświadczenia badawcze różnorodnych elementów i układów elektronicznych w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej wykazały, że są one wrażliwe na szereg zjawisk elektromagnetycznych. A zjawiska te nie dość, że powszechnie występują w otaczającym nas środowisku to i na skutek gwałtownego roz-

woju cywilizacyjnego zmienia się ich ilość i charakter. Dlatego istotne staje się rozwiązanie istniejących, jak i rozpoznanie potencjalnych problemów, związanych z poprawną pracą regulatorów i silników BLDC w środowisku elektromagnetycznym.

2. Środowisko elektromagnetyczne

2.1 Ogólny opis środowiska elektromagnetycznego

Środowisko elektromagnetyczne to ogół zjawisk elektromagnetycznych istniejących w danym obszarze i związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną. Kompatybilność elektromagnetyczna jest zdolnością danego urządzenia do poprawnej pracy w środowisku elektromagnetycznym i nieemitowanie do niego zaburzeń o ponad normatywnych poziomach.

Z uwagi na potencjalnie bardzo szeroki zakres obecnego i przyszłego zastosowania napędów BLDC przedmiotem dalszego rozważania będzie środowisko elektromagnetyczne związane zarówno z obszarem Ziemi jak i jej atmosfery, które potencjalnie może mieć istotny wpływ na pracę napędów BLDC. Środowisko elektromagnetyczne z uwagi na przyczynę powstawania zjawisk dzielimy na naturalne i związane

z działalnością człowieka.

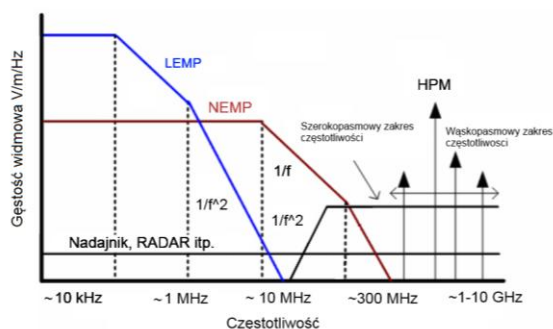
Do najważniejszych zjawisk zaliczmy:

- wyładowania elektryczności statycznej - ESD,
- wyładowania atmosferyczne - LEMP,
- stałe pola elektryczne i magnetyczne,
- pola elektromagnetyczne o niskiej częstotliwości i o częstotliwości radiowej,
- mikrofalową energię kierowaną - HPM,
- impulsy związane z wybuchem nuklearnym - NEMP. Opis wybranych zjawisk tworzących środowisko elektromagnetyczne przytoczono w oparciu o normę NO-06-A218-4 [4].

2.2 Charakterystyka wybranych zjawisk tworzących środowisko elektromagnetyczne

2.2.1 HPEM (High Power Electromagnetic Environments)

Pola elektromagnetyczne wysokiej mocy o szczytowym poziomie natężenia pola elektrycznego przekraczającego 100 V/m. Na rys. 1 przedstawiono typowe środowiska elektromagnetyczne określane wspólnym mianem HPEM.



Rys.1. Porównanie wysokomocowych środowisk elektromagnetycznych HPEM [4]

2.2.2 LEMP (Lightning EMP)

Impulsy elektromagnetyczne wywołane wyładowaniami atmosferycznymi. Dotyczy wszystkich wyładowań atmosferycznych, tj. wyładowań chmura-chmura, chmura-ziemia, jak i wariantów tychże wyładowań, tj. pozytywnych i negatywnych w odniesieniu do kierunku przepływu prądu przez powstały łuk elektryczny. Rozpatrywane są wyładowania zarówno bezpośrednie jak i wyładowania pośrednie występujących w pewnej odległości od obiektu.

2.2.1 NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse)

W wyniku wybuchu bomby jądrowej powstaje promieniowanie gamma, które, oddziałując z powietrzem, jonizuje jego atomy i rozpędza elektrony, które stają się źródłem promieniowa-

nia elektromagnetycznego. Te zaś są w stanie uszkadzać i niszczyć urządzenia i całe układy elektroniczne. Ogólna nazwa wielu kategorii impulsów elektromagnetycznych (EMP) związanych z wybuchem jądrowym (HEMP, SREMP, SGEMP). HEMP (High-Altitude EMP) jest efektem wybuchu bomby jądrowej na wysokości powyżej 20 km nad powierzchnią Ziemi. Natężenie pola elektromagnetycznego osiąga w czasie 10 ns wartości 5 kV/m.

2.2.3 HPM (High Power Microwaves)

Promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej w zakresie 100 MHz – 35 GHz, Źródła HPM wytwarzają wysokoenergetyczne pola elektromagnetyczne za pomocą fali ciągłej, pojedynczych impulsów, serii impulsów oraz sygnałów modulowanych o mocach dochodzących do GW w impulsie.

2.2.4 Pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej (Radio Frequency)

Źródłem są wszelkie nadajniki radiowe i radiolokacyjne. Pracują one w paśmie od 10 kHz do 45 GHz. Średnie natężenia pola przez nie wytwarzane jest na poziomie od kilkunastu do kilku tysięcy V/m.

2.2.4 Pole magnetyczne prądu stałego DC oraz pole magnetyczne niskich częstotliwości (Low Frequency)

Związane z przepływem prądu stałego i prądu o małej częstotliwości. Pola takie istnieją wokół przewodów energetycznych, na podstacjach trakcyjnych, urządzenia do bezprzewodowego ładowania samochodów elektrycznych oraz okrętach. Przykładowo typowe pole przy demagnetyzacji okrętu wynosi 1600 A/m. Zjawisko to może powodować istotny wpływ na prace czujników Halla stosowanych niekiedy do określania położenia rotora silnika BLDC.

2.2.5 Wyładowania elektryczności statycznej ESD (Electrostatic Discharge)

Powszechnie znane i występujące zjawisko gromadzenia się ładunków elektrostatycznych na urządzeniach i na ludziach oraz ich przekazywania pomiędzy ciałami o różnych potencjałach elektrostatycznych. Ładunki elektryczne są przekazywane zawsze gdy dwa ciała mają bezpośredni kontakt lub przez warstwę izolacyjną lub gdy zbliżają się do siebie. Tarcie lub uderzenie cząstek o ciało stałe, może znacznie zwiększyć zjawisko gromadzenia się ładunków.

W przypadku bezzałogowych statków powietrznych gromadzenie ładunków elektrostatycznych może przebiegać dodatkowo w przypadku przemieszczania się ich przez opady deszczu, śniegu, gradu i pyłu. Może też występować w sytuacji nagłego połączenia lub rozłączenia z innym obiektem w szczególności wykonanym z tworzywa sztucznego. Ładunki elektrostatyczne są gromadzone na statku powietrznym w trakcie jego lotu z uwagi na brak możliwości ich odprowadzenia.

Ogólnie istnieje możliwość naładowania się ludzi do potencjału 25 kV zaś środków transportowych typu śmigłowce do 300 kV.

3. Badania odporności napędu BLDC na wyładowania ESD

3.1. Obiekt badań

Badanym obiektem był bezzałogowy statek powietrzny (wielowirnikowiec) – rys. 2 o parametrach:

- rozpiętość po rozłożeniu: 700 mm,
- długość z głowicą: 900 mm,
- masa: 5 kg,
- korpus: kompozyt zbrojony włóknem węglowym pokryty lakierem akrylowym.



Rys. 2. Badany BSP wraz z czterema zespołami napędowymi BLDC bez śmigieł

Do zasilania badanego BSP wykorzystano pakiet o parametrach:

- Typ: litowo-polimerowy,
- Liczba cel: 6,
- Napięcie znamionowe: 22,2 V,
- Pojemność: 16 Ah (355 Wh),
- Prąd rozładowania ciągły: 240 A,
- Prąd rozładowania szczytowy: 480 A.

Badany statek powietrzny napędzany jest przez cztery układy złożone z silników BLDC i zintegrowane z nimi sterowniki, co pokazano na rys. 3 i rys. 4. Napędy te umieszczono na koń-

cach ramion wykonanych z włókna węglowego. We wnętrzu każdego z ramion poprowadzono nieekranowane przewody o długości 240 mm – rys. 5, które zasilają i sterują zespołami napędowymi.

Silniki BLDC posiadają następujące parametry:

- Układ uzwojeń: trójkąt,
- Moc 710 W,
- Napięcie zasilające: 22,2V,
- Maksymalny pobór prądu: 32A,
- KV: 650 obr/V,
- Maksymalna prędkość obrotowa: 16 000 obr/min,
- Masa: 80 g.



Rys. 3. Silnik BLDC zastosowany do napędu badanego BSP

Każdy z silników jest sterowany indywidualnym regulatorem umieszczonym bezpośrednio pod silnikiem o parametrach:

- Napięcie zasilające: 22,2V,
- Maksymalny pobór prądu: 40A,
- Sterowanie: PWM 5V, zakres 1-2 ms,
- Masa: 30 g.



Rys. 4. Regulator silnika BLDC w badanym obiekcie

Komputer sterujący pracą regulatorów każdego z silników znajduje się w środku masy wielowirnikowca.



Rys. 5. Widok jednego z ramion BSP z rozmieszczeniem silnika, sterownika i przewodów doprowadzających zasilanie i sygnały sterujące

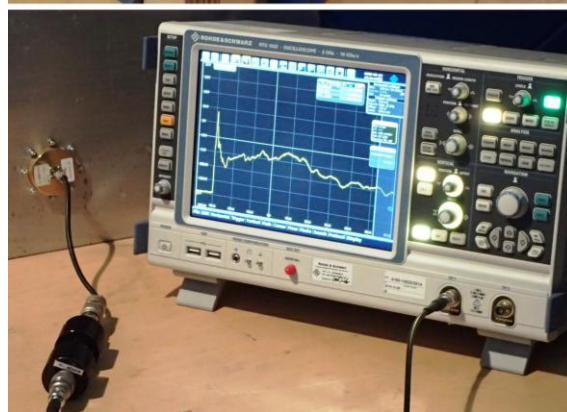
3.2. Stanowisko badawcze ESD

Podstawowe wymagania normatywne w zakresie metod badań odporności urządzeń na wyładowania elektryczności statycznej ESD są zawarte w normach PN-EN 61000-4-2, i NO-06-A211 [2],[3]. Stanowisko, na którym badano BSP z napędami typu BLDC przedstawiono na rys. 6. Jest ono wyposażone w normatywną poziomą płaszczyznę sprzęgającą HCP o rozmiarze 160 x 80 cm i pionową płaszczyznę sprzęgającą VCP o rozmiarze 50 x 50 cm. Źródłem impulsów ESD jest generator z wymaganymi wkładkami kształtującymi impulsy i elektrodami wyładowczymi.

Przed badaniami i po badaniach weryfikowano kształt generowanych impulsów ESD na stanowisku pokazanym na rys. 7. Z uwagi na bardzo krótki czas narastania impulsów ESD – poniżej 1 ns do ich prawidłowej rejestracji wymagany jest oscyloskop o paśmie minimum 2 GHz. W zależności od środowiska pracy i przeznaczenia badanego obiektu stosuje się poziomy narażeń mające zastosowanie do badanych wyrobów lub grup wyrobów.



Rys. 6. Stanowisko stołowe do badań odporności na wyładowania ESD w WITU Zielonka



Rys. 7. Stanowisko do weryfikacji impulsów ESD

W większości zastosowań cywilnych parametry wyładowań kontaktowych ESD wynoszą maksymalnie 8 kV a w przypadku wyładowań powietrznych 15 kV. Standardowo jest wtedy stosowany układ kształtowania impulsu o parametrach 150 pF / 330 Ω. W zastosowaniach wojskowych parametry wyładowań ESD są bardziej zróżnicowane. Stosowane do narażania obiektów wojskowych poziomy napięć są zazwyczaj wyższe. Wymagane są ponadto dodatkowo inne moduły kształtujące przebiegi. Dla narażeń pochodzących od personelu podczas obsługi takich obiektów przykładane są napięcia wyładowań ESD wynoszące maksymalnie 25 kV. Stosowane są wtedy dwa układy kształtujące impulsy: 500 pF / 500 Ω oraz 500 pF / 5000 Ω. W przypadku wyładowań ESD generowanych przez śmigłowce maksymalny poziom napięcia narażeń dochodzi do 300 kV i wtedy stosuje się układ kształtowania impulsu o parametrach 1000 pF / 1 Ω.

3.1. Wyniki narażenia BSP wyładowaniami ESD

Przed badaniami ustalono, że badany BSP będzie narażany zgodnie z wymaganiami podanymi w tablicy 1 normy NO-06A-211 [3], dla

trybu obsługiwanego – czyli narażenia pochodzące od personelu. Jednocześnie ustalono, że BSP będzie narażany wyłącznie maksymalnym poziomem wartości napięcia czyli 25kV.

Tablica. 1. Wartości narażeń ESD dla obiektów wojskowych [3]

| Źródło ładunków | Parametry | | | |
|-----------------|--------------------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | Napięcie (kV) | Pojemność (pF) | Rezystancja rozładowania (Ω) | Indukcyjność rozładowania (μ F) |
| Obsługiwanie | $\pm 25 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $5000 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 25 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 20 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $5000 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 20 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 15 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $5000 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 15 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 10 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $5000 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 10 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 5 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $5000 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Obsługiwanie | $\pm 5 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | $500 \pm 5 \%$ | < 5 |
| Transportowanie | $\pm 300 \pm 5 \%$ | $1000 \pm 10 \%$ | 1 max^2 | < 20 |
| Transportowanie | $\pm 250 \pm 5 \%$ | $1000 \pm 10 \%$ | 1 max^2 | < 20 |
| Transportowanie | $\pm 200 \pm 5 \%$ | $1000 \pm 10 \%$ | 1 max^2 | < 20 |
| Transportowanie | $\pm 150 \pm 5 \%$ | $1000 \pm 10 \%$ | 1 max^2 | < 20 |
| Transportowanie | $\pm 100 \pm 5 \%$ | $1000 \pm 10 \%$ | 1 max^2 | < 20 |
| Transportowanie | $\pm 50 \pm 5 \%$ | $1000 \pm 10 \%$ | 1 max^2 | < 20 |
| Transportowanie | $\pm 25 \pm 5 \%$ | $1000 \pm 10 \%$ | 1 max^2 | < 20 |

Przyjęto do wykonania dwa rodzaje narażeń ESD. Narażenia pośrednie i narażenia bezpośrednie. Narażenia pośrednie przykładano do poziomej i pionowej płaszczyzny sprzęgającej co odzwierciedlało mogące zaistnieć w rzeczywistych warunkach wyładowania do obiektów znajdujących się w pobliżu badanego BSP. Narażenia bezpośrednie przykładano do wybranych punktów obudowy badanego BSP co przedstawiono na rys. 8. Do każdego z narażanych punktów przykładano po 20 impulsów dodatnich i 20 impulsów ujemnych. Narażenia pośrednie nie wpłynęły w żaden sposób na prawidłowość pracy badanego BSP, w tym i jego napędów. Narażenia bezpośrednie w punktach 1-5 zakończyły się także wynikiem pozytywnym.



Rys. 8. Rozmieszczenie narażanych punktów na badanym BSP



Rys. 9. Badany BSP podczas przykładania krytycznego narażenia ESD o poziomie 25 kV

Podczas bezpośredniego narażenia punktu nr 6 (śruba na obudowie) – rys. 9 - zaobserwowano zmiany prędkości obrotowej napędów. Po kolejnych kilku impulsach nastąpiło zatrzymanie jednego z silników a ze środka obudowy zaczął wydobywać się dym. Natychmiastowo odłączono zasilanie BSP. Na tym etapie dalsze badania wstrzymano. Po analizie stwierdzono spalanie się jednego z regulatorów i uszkodzenie izolacji sterowanego nim silnika BLDC - rys. 10. Najbardziej prawdopodobną przyczyną uszkodzenia napędu było pole przejściowe od wyładowań ESD, sprzężone do przewodów i regulatora. Wywołane tym polem napięcia lub prądy najprawdopodobniej spowodowały zabronione wystawienie regulatora w ten sposób, że nastąpiło w nim jednoczesne załączenie kluczy górnych i dolnych półmostka H.



Rys. 10. Wpływ wyładowania ESD 25kV na niezabezpieczony zespół napędowy BLDC (spalony regulator)

4. Literatura

- [1]. A. Budziłowicz "Zastosowanie Silników BLDC we współczesnych napędach elektrycznych i w motoryzacji", AUTOBUSY, 6/2015.
- [2]. PN-EN 61000-4-2:2011 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Część 4-2: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne.
- [3]. NO-06-A211:2016 – Kompatybilność elektromagnetyczna – odporność sprzętu wojskowego na wyładowania elektrostatyczne – Wymagania i metody badań.
- [4]. NO-06-A218-4:2015 – Technika wojskowa.

Warunki Środowiskowe. Część 4: Elektryczne i elektromagnetyczne oddziaływania środowiskowe.