

Analiza porównawcza zaburzeń promieniowanych dla bezzałogowych platform latających z uwzględnieniem elektrycznych układów silnikowych

Streszczenie. W artykule omówiono sposób pomiaru i wyniki badań emisji zaburzeń promieniowanych dla bezzałogowych platform latających w zależności od zainstalowanej elektroniki sterującej. Badania przeprowadzono dla dwóch różnych autopilotów, obiektu w stanie spoczynku, oraz w stanie symulowanego zawisu.

Abstract. This article discusses the method of measurement and test results of radiated disturbance emissions for unmanned aerial vehicle depending on the installed control electronics. Tests were performed for two different autopilots, an object in standby mode, and the simulated state of hovering (**Comparative analysis of the radiated disturbances emissions for unmanned aerial vehicle including electric motor systems**).

Słowa kluczowe: Kompatybilność elektromagnetyczna, emisja zaburzeń promieniowanych, bezzałogowe platformy latające, autopilot.

Keywords: Electromagnetic compatibility, emission of electromagnetic disturbance, unmanned aerial vehicle (UAV), autopilot.

doi:10.12915/pe.2014.07.30

Wprowadzenie

Postęp technologiczny, minimalizacja i wzrost dostępności elektroniki, której towarzyszy zwiększanie możliwości obliczeniowych jednostek sterujących pozwala na realizację coraz ciekawszych i ekscytujących idei. Jednym z nowych, dynamicznie rozwijających się tematów są bezzałogowe obiekty latające (UAV ang. Unmanned Aerial Vehicle). Bezzałogowy obiekt latający to statek powietrzny, który nie wymaga do lotu załogi obecnej na pokładzie. Jest pilotowany zdalnie bądź wykonuje lot autonomiczny według zaprogramowanego planu. Ze względu na niezaprzeczalne zalety swojej konstrukcji, obiekty uzyskały szeroki wachlarz zastosowań w sektorze militarnym, przyjmując także cechy bojowe. Wymieniony wyżej postęp technologiczny pozwolił na rozwój energooszczędnych, wydajnych obliczeniowo układów sterujących oraz miniaturowych scalonych czujników, co przyczyniło się do wzrostu zainteresowania tą tematyką także w sektorze cywilnym.

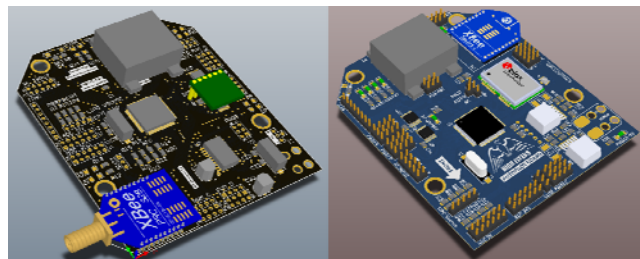
Obecnie coraz częściej do wiadomości publicznej podawane są informacje o wykorzystaniu bezzałogowych platform latających w komercyjnych zastosowaniach. Rozwijane są takie konstrukcje jak: płatowce, wirnikowce (platformy pionowego startu i lądowania – VTOL ang. Vertical take-off and landing) czy sterowce. Wszystkie wymienione konstrukcje charakteryzują się możliwością monitorowania terenów i obiektów znajdujących się w dużych odległościach od naziemnej stacji kontroli lotu. W zależności od potrzeb i przeznaczenia obiekty wyposaża się w szereg czujników lub w kamery termowizyjne itp.

W zastosowaniach komercyjnych wykorzystuje się je między innymi: przy fotografowaniu pól uprawnych w celu dokumentowania i szacowania ich wielkości, w poszukiwaniu osób zaginionych na terenach zalesionych, monitoringu linii wysokiego napięcia, monitoringu imprez masowych oraz obszarów dotkniętych klęskami żywiołowymi, gdzie wysłanie obiektu z załogą na pokładzie byłoby zbyt niebezpieczne. Obecnie służby mundurowe takie jak policja czy straż graniczna oraz ratownictwo, przejawiają bardzo duże zainteresowanie tego typu systemami ze względu na możliwość obserwacji dużych obszarów terenu, krótki czas przygotowania do lotu oraz możliwość wykonania lotu autonomicznego. Obsługa komercyjnego obiektu UAV ogranicza się do zaplanowania trasy na mapie w naziemnej stacji kontroli lotu.

Quadrotor jest przykładem bezzałogowego obiektu latającego, który wyposażony jest w cztery wirniki.

Zbudowany jest z symetrycznej ramy, na końcach, której znajdują się jednostki napędowe umożliwiające ruch platformy w przestrzeni. Posiada on podobne cechy i fizykę lotu do helikoptera. Quadrotory to bardzo wszechstronne obiekty UAV ze względu na możliwość „zawisnięcia” w powietrzu oraz wykonania pionowego startu i lądowania na obszarach trudnodostępnych. W badanym modelu, do stabilizacji lotu zastosowano kaskadowy regulator PID. Pętla wewnętrzna regulatora wykorzystuje prędkości kątowe, zewnętrzna pętla korzysta z kątów Eulera. Wykorzystano również wiele innych, bardziej zaawansowanych rozwiązań prezentowanych w literaturze [1][2][3].

Obecnie prawo dotyczące obiektów bezzałogowych ewoluuje i ustawodawca wypracowuje swoje stanowisko. Do czasu uchwalenia odpowiednich przepisów obiekty bezzałogowe traktowane są na równi z hobbystycznymi modelami sterowanymi radiowo. Ustawodawca nie przewiduje także w obowiązujących normach wartości dla pomiarów zaburzeń promieniowanych, którymi mają się charakteryzować UAV. Jednostki (przedsiębiorstwa, ośrodki badawczo-naukowo-rozwojowe), które zajmują się rozwijaniem problematyki związanej z UAV wykorzystują dla celów militarnych normy dotyczące wojsk lądowych dla układów wyośnych, a w przypadku projektowania układów dla komercyjnych zastosowań korzystają z norm przemysłowych.



Rys. 1. Analizowane modele autopilotów

Badane modele

Dzięki międzywydziałowemu kołu naukowemu bezzałogowych obiektów latających High Flyers, które działa przy Politechnice Śląskiej w Gliwicach (www.uav.polsl.pl) i ściśle współpracuje z konstruktorami z ośrodków badawczo-rozwojowych projektujących bezzałogowe platformy latające udostępniono do analizy

dwa autopiloty (rys. 1) składające się z tych samych elementów. Autopiloty zostały zaprojektowane przez dwie niezależne grupy projektantów, projektujące układy zgodnie z przyjętymi zasadami kompatybilności elektromagnetycznej i zgodnie z praktyką inżynierską [4][5][6]. Wszystkie nieużywane wejścia układów zostały podłączone do masy lub innych punktów zgodnie z zaleceniami producentów. Pozostawienie wejść „w powietrzu” może prowadzić do przypadkowego przełączania, które w konsekwencji mogą zachowywać się jak nieintencjonalne anteny. Wylane obszary zasilania i masy (poligony) nie są poprowadzone do krawędzi płyt PCB. Ścieżki sygnałowe nie są prowadzone przy krawędzi PCB. Zadbano by na płytach nie było „pływających wylanych płaszczyzn” tzn. płaszczyzn niepodłączonych do ustalonych potencjałów, co mogłoby powodować generowanie dodatkowych zaburzeń. Taka sytuacja potencjalnie mogłaby spowodować niepożądane indukowanie się prądu na niepodłączonych płaszczyznach. Zwrócono szczególną uwagę by nie prowadzić ścieżek i połączeń nad/pod przerwami/szczelinami w wylanych poligonach mas [7]. Płaszczyzny masy dla układów cyfrowych i analogowych zostały odseparowane od siebie z wykorzystaniem odpowiednich kondensatorów. Zastosowano wiele dodatkowych połączeń między warstwami dla tych samych płaszczyzn, by zmniejszyć możliwość występowania różnicy potencjałów dla tych samych sygnałów. Przy projektowaniu układów radiowych dołączonych do modeli zabrano o dopasowanie linii sygnałowych/transmisyjnych. Zadbano by kondensatory i rezystory znajdowały się w bardzo małej odległości od układów

Układy autopilotów zostały tak zaprojektowane by były uniwersalne i kompleksowo wyposażone. Uniwersalność polega na możliwości kontrolowania lotu zarówno bezzałogowego płatowca (rys. 2) jak i wirnikowca (rys. 3).



Rys. 2. Modele płatowców współpracujące z prezentowaną elektroniką

W skład autopilotów wchodzi między innymi: przetwornica 5V pracująca z częstotliwością przetwarzania 38,462kHz, przetwornica 3,3V pracująca z częstotliwością przetwarzania 31,01kHz, mikrokontroler STM32F103, którego wewnętrzna pętla PLL taktowana jest kwarcem 8MHz i generuje sygnał zegarowy 10MHz, 25MHz, 40MHz, 50MHz i 72MHz, moduł radiowy XBee (2,4GHz), GPS (1,575GHz). Autopilot jest źródłem sygnału PWM o częstotliwości 300Hz. Porty wejścia-wyjścia (GPIO) taktowane są zegarem o częstotliwości 50MHz. Dalsze prace nad modelami układów autopilotów będą sprowadzały się to zastąpienia mikrokontrolera i wielu

innych układów peryferyjnych (w tym pamięci) układem logiki programowalnej FPGA (Field Programmable Gate Array). Dzięki zmianie technologii w przyszłości będzie można zastosować bardziej wyszukane regulatory, między innymi takie jak regulator LQR. Dzięki zastosowaniu układu FPGA, który posiada możliwość modyfikacji struktury wewnętrznej, w przyszłości pojawi się możliwość przeprowadzenia badań dążących do optymalizacji autopilotów ze względu na rozmiary (zastąpienie mikrokontrolera, części logiki i pamięci jednym układem scalonym) i wykorzystanie energii. Zoptymalizowanie układów pod kątem wykorzystywania energii może w przyszłości pozwolić na zredukowanie poziomów emisji zaburzeń promieniowanych [8].

Analiza zaburzeń promieniowanych

Analiza dotyczy porównania zaburzeń promieniowanych w rzeczywistych systemach autopilota dla układów UAV. W celu oceny wielkości zaburzeń promieniowanych przez silniki zaprezentowano poziomy emisji dla trybów pracy z załączonymi jak i wyłączonymi układami silnikowymi (równocześnie pracowały 4 silniki każdy o mocy maksymalnej 280W). Autopiloty zasilane były za pomocą układu akumulatorowego (litowo-polimerowego) o pojemności 7000mAh i napięciu nominalnym 11,1V.

Pomiary zostały wykonane w komorze bezodbiciowej Frankonia CHC wyposażonej w specjalistyczną aparaturę pomiarową (rys. 4), zgodnie z normą dotyczącą zaburzeń promieniowanych w zakresie częstotliwości 0.03–1GHz [9].

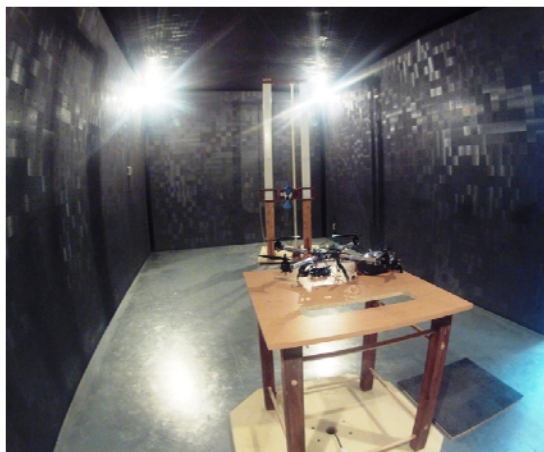


Rys. 3. Modele wirnikowców współpracujące z prezentowaną elektroniką

Każdy układ poddano pomiarom dla kilku wysokości (komora umożliwia przeprowadzenie badań dla wysokości w zakresie od 100 do 250 cm) analizując jednocześnie poziomy zaburzeń promieniowanych dla dwóch polaryzacji (pionowej i poziomej). Każdy analizowany układ był poddany analizie w 4 różnych pozycjach względem osi y (obrót o 90 stopni). Dzięki analizie z załączonymi i wyłączonymi silnikami, przedstawione wyniki obrazują, jaki poziom emisji zaburzeń promieniowanych w całym układzie stanowi sama elektronika, a jaki układ w zaburzenia promieniowane mają silniki dopuszczone do sprzedaży na rynku i wykorzystywane przy produkcji bezzałogowych platform latających. Wykorzystane silniki to Emax GT2215/12 KV905 – Grand Turbo (silnik bezszczotkowy).

W artykule przedstawiono wyniki dla przypadków, w których emisja zaburzeń promieniowanych osiągnęła największe poziomy, dla wszystkich badanych ustawień (tzw. worst case). Wyniki przeprowadzonych badań dotyczą pomiarów w odległości 3m od układu. Na każdej charakterystyce naniesiono linię wskazującą dopuszczalny poziom emisji zaburzeń promieniowanych dla klasy B urządzeń, zgodnie z normą PN-EN 55022 [9].

Tabela 1 prezentuje dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń promieniowanych dla norm wykorzystywanych w środowisku przemysłowym (klasa A) oraz środowisku mieszkalnym, handlowym i lekko uprzemysłowionym (klasa B) [9]. Norma PN-EN 55022 jest wykorzystywana dla bezzałogowych platform latających, których odbiorcami są firmy, instytucje i osoby prywatne. Norma NO-06-A200 jest przeznaczona wyłącznie dla urządzeń przygotowywanych do użytku wojskowego i specjalnego przeznaczenia [10]. W odniesieniu do urządzeń stosowanych w Siłach Zbrojnych, zasadniczym dokumentem (odpowiednikiem Dyrektywy EMC wykorzystywany w przypadku urządzeń cywilnych) są dokumenty normalizacyjne typu MIL-STD adaptowane przez kraje członkowskie NATO w postaci krajowych norm obronnych [11]. Zasady i wymagania związane z metodami badań i prowadzeniem pomiarów zgodnie z normą [10] różnią się od norm przeznaczonych dla sprzętu dopuszczonego do użytku cywilnego [11].



Rys. 4. Bezodbiciowa komora Frankonia CHC

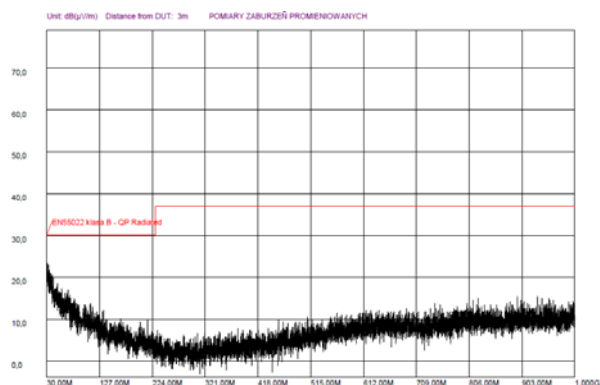
Tabela 1. Dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń promieniowanych w odległości 3m [dBuV/m] dla odpowiednich klas urządzeń.

Częstotliwość / Norma, klasa	0.03 - 0.23 [GHz]	0.23 – 1 [GHz]
Klasa A Norma PN-EN 55022	40 [dBuV/m]	47 [dBuV/m]
Klasa B Norma PN-EN 55022	30 [dBuV/m]	37 [dBuV/m]

Pierwszy pomiar, który został wykonany to pomiar poziomu tła komory, który jest zamieszczony na rysunku 5. Dla obu modeli autopilota, w przypadku kiedy zasilona była jedynie elektronika, obiekt spełnia wymagania zgodnie z normą przeznaczoną do zastosowań w środowisku mieszkalnym, dla urządzeń klasy B (kategoria bardziej restrykcyjna) [9]. Analizując charakterystyki (Rys. 6) można zauważyć, że występują różnice w zaprojektowanych układach. W pierwszym przypadku (Rys. 6, model A) występuje niepokojące zaburzenie dla 300MHz, które w modelu B nie występuje w takim wymiarze. Również w modelu B występują dwa większe zaburzenia, które nie są zauważalne w poprzednim modelu.

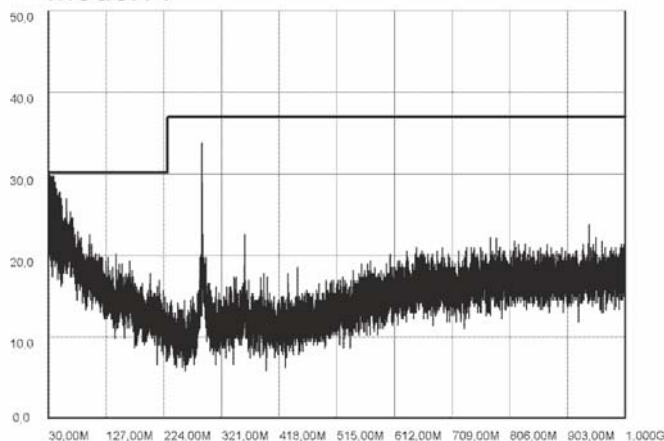
Dla przypadków z załączoną elektroniką autopilota oraz silnikami, układy autopilotów nie spełniają norm zgodnych z

tabelą 1 dla obu klas urządzeń. Widocznych jest wiele częstotliwości, dla których poziomy emisja zaburzeń promieniowanych są niepokojąco wysokie. Wszystkie te zaburzenia są spowodowane pracą silników elektrycznych. Istotną kwestią są tutaj również przetwornice impulsowe zasilające silniki, które dla przypadków, w których silniki były wyłączone nie były obciążone, przez co nie powodowały dodatkowej emisji. Tak jak dla przypadku z wyłączonymi silnikami jest widoczna różnica w zaprojektowanych układach. Niewiele występujących zaburzeń w analizowanych przypadkach występuje na tych samych częstotliwościach.

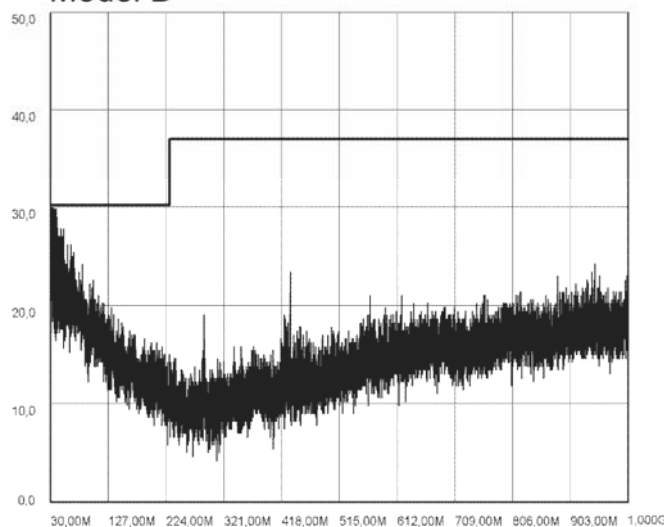


Rys. 5. Poziom tła elektromagnetycznego komory.

Model A



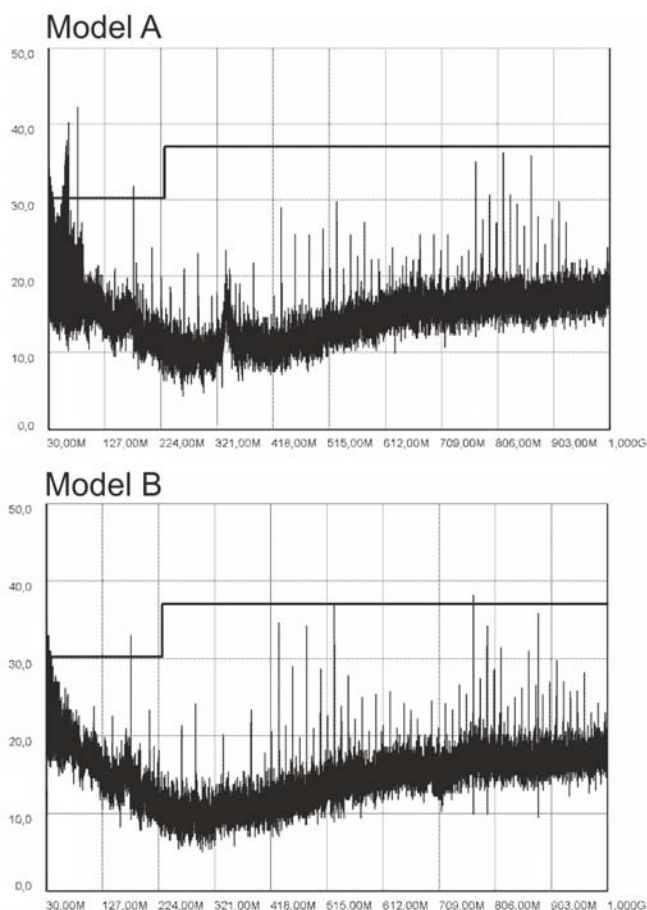
Model B



Rys. 6. Poziom zaburzeń promieniowanych przez elektronikę układów autopilotów bez załączonych silników, Model A i B - polaryzacja pozioma, wysokość 100cm

Podsumowanie

Modele autopilotów zostały zbudowane przez dwie różne grupy projektowe, co przełożyło się na różne rozmieszczenie komponentów na płycie PCB a w konsekwencji - dla tak samo zorientowanego obiektu UAV - na występowanie problematycznych zaburzeń promieniowanych na innych częstotliwościach. W związku z zastosowaniem dobrych praktyk inżynierskich podczas projektowania autopilotów, sama elektronika spełnia wymagania normy PN-EN 55022. Natomiast w momencie włączenia silników i co za tym idzie, zwiększonego poboru prądu, zaburzenia emitowane przez obiekt przekraczają większość dozwolonych progów.



Rys. 7. Poziom zaburzeń promieniowanych przez elektronikę układów autopilotów z załączonymi silnikami, Model A i B - polaryzacja pozioma, wysokość 100cm

Należy także podkreślić, że ze względów bezpieczeństwa, obiekt UAV był przytwierdzony wewnątrz komory bezodbiwojowej do zadanego miejsca, a ciąg silników ustawiony był na granicy oderwania się obiektu od podłoża. Wykonanie zawisu wewnątrz komory bezodbiwojowej byłoby niebezpieczne a dodatkowo obiekt podczas zawisu zawsze wykonuje niepożądane w tym wypadku zmiany położenia i orientacji – przez co przeprowadzenie badań byłoby bardzo utrudnione. Ważną konkluzją niniejszego artykułu jest próba określenia problematyki ustalania norm kompatybilności elektromagnetycznej dla tego typu obiektów UAV. Z całą mocą należałoby zwrócić uwagę na ustalanie stanu funkcjonowania, pozycji i orientacji obiektu podczas przeprowadzania badań. Dla urządzeń elektronicznych stanem, w którym urządzenie jest badane – jest stan typowego, normalnego funkcjonowania urządzenia. W takim wypadku dla bezzałogowych obiektów latających musiałyby to być moment lotu, niestety jest to niewykonalne

dla wielu obiektów UAV. Dla przykładu bezzałogowych płatowców UAV, które nie są obiektami pionowego startu i lądowania i nie mogą wykonać zawisu, z całą pewnością musiałyby być badane „stacjonarnie” przy wyłączonych silnikach, bądź obiekt musiałyby mieć silnik/silniki włączone na taką samą moc jak podczas lotu, jednak kadłub byłby przytwierdzony w zadanym miejscu wewnątrz komory bezodbiwojowej. W konsekwencji narzucałoby to przeprowadzanie badań kompatybilności dla każdego obiektu UAV w stanie „stacjonarnym”. Dodatkowo dla dużych bezzałogowych obiektów latających znakomitą większość zaburzeń generowałby włączony na wysokie obroty silnik/silniki, co narzucałoby wprowadzenie różnych przedziałów wagowych i różnych kategorii obiektów.

W kolejnym etapie badań, należałoby wybrać model autopilota, dla którego badania wykazały mniejsze zaburzenia promieniowane a następnie określić wpływ przetwornic DC/DC oraz wpływ samych silników na zaburzenia promieniowane. W celu poprawy wyników badań można zastosować inną jednostkę sterującą (układ FPGA), wielowarstwowy obwód drukowany z płaszczyznami masy i zasilania oraz ewentualny shielding elementów kluczujących.

LITERATURA

- [1] Błachuta, M. J.; Czyba, R.; Janusz, W.; UAV glider control system based on dynamic contraction method, Conference: 17th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), pp. 114-118, Miedzyzdroje, Poland, 27-30 Aug 2012.
- [2] Czyba R., Design of Attitude Control System for an UAV Type-Quadrotor Based on Dynamic Contraction Method, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 644-649, 14-17 Jul 2009 Singapore.
- [3] Czyba R., Szafranski G., Control Structure Impact on the Flying Performance of the Multi-Rotor VTOL Platform - Design, Analysis and Experimental Validation, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol.10, Article Nr.62, Published: Jan 22 2013.
- [4] Joffe E., Kai-Sang L., Grounds for grounding, Wiley-IEEE Press, 2010.
- [5] Bogatin E., Signal and Power Integrity – Simplified, Prentice Hall, 2010.
- [6] Noga A., Wójcik D., Kołodziej Ł., Układ do demonstracji zaburzeń promieniowanych w obwodach drukowanych, Przegląd Elektrotechniczny, 88 (2012), nr 2, 20-22.
- [7] Wójcik D., Noga A., Emisja zaburzeń promieniowanych przez obwody drukowane - przykład analizy numerycznej, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr.3, 182-184.
- [8] Mocha J., Woznica T., Emisja zaburzeń elektromagnetycznych przez systemy mikroprocesorowe implementowane w układach programowalnych FPGA, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr 3, 157-160.
- [9] PN-EN 55022, "Urządzenia informatyczne – Charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych – Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru.
- [10] NO-06-A200, „Kompatybilność elektromagnetyczna. Poziomy dopuszczalne emisji ubocznych i odporności na narażenia elektromagnetyczne.
- [11] Musiał S., Kubiak I., Wymagania i metody badań EMC w odniesieniu do urządzeń przeznaczonych do stosowania w Siłach Zbrojnych, EMC'09, VI Krajowe sympozjum, Łódź, 8-9.10.2009r., strony: 57-59.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Bernacki, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: krzysztof.bernacki@polsl.pl;

mgr inż. Dominik Wybranicz, BNT Sp. z o. o., ul. Mireckiego 27, 41-209 Sosnowiec, <http://www.bntsystems.pl/>, E-mail: dwybranicz@bntsystems.pl;

mgr inż. Adam Popowicz, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: adam.popowicz@polsl.pl;

mgr inż. Dariusz Meiser, ELZAB S.A, ul. Kruczkowskiego 39, 41-813 Zabrze, E-mail: meiser@elzab.com.pl;