

## SYMULATOR ROJU DRONÓW W FORMACJACH UWZGLĘDNIAJĄCY ZUŻYCIE AKUMULATORA

DARIUSZ MIEDZIŃSKI, MARIUSZ JACEWICZ, SEBASTIAN TOPCZEWSKI, ROBERT GŁĘBOCKI

*Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Warszawa*

*e-mail: [dariusz.miedzinski2.dokt@pw.edu.pl](mailto:dariusz.miedzinski2.dokt@pw.edu.pl); [mariusz.jacewicz@pw.edu.pl](mailto:mariusz.jacewicz@pw.edu.pl);*

*[sebastian.topczewski@pw.edu.pl](mailto:sebastian.topczewski@pw.edu.pl); [robert.glebocki@pw.edu.pl](mailto:robert.glebocki@pw.edu.pl)*

W poniższym artykule przedstawiono numeryczną symulację lotu roju dronów, którego zadaniem jest zapewnienie łączności na wyznaczonym obszarze. Algorytm sterowania oparto na metodzie Reynoldsa oraz cyfrowych feromonach. Przedstawiono przykładowe scenariusze symulacji polegające na locie poszczególnych formacji po zadanym torze ze szczególnym uwzględnieniem poziomu naładowania akumulatorów kolejnych dronów. Stworzony model symulacyjny pozwala na planowanie misji oraz przygotowanie testów w locie rzeczywistego systemu.

*Słowa kluczowe:* roje dronów, lot w formacji, quadrotor, autonomiczne roje

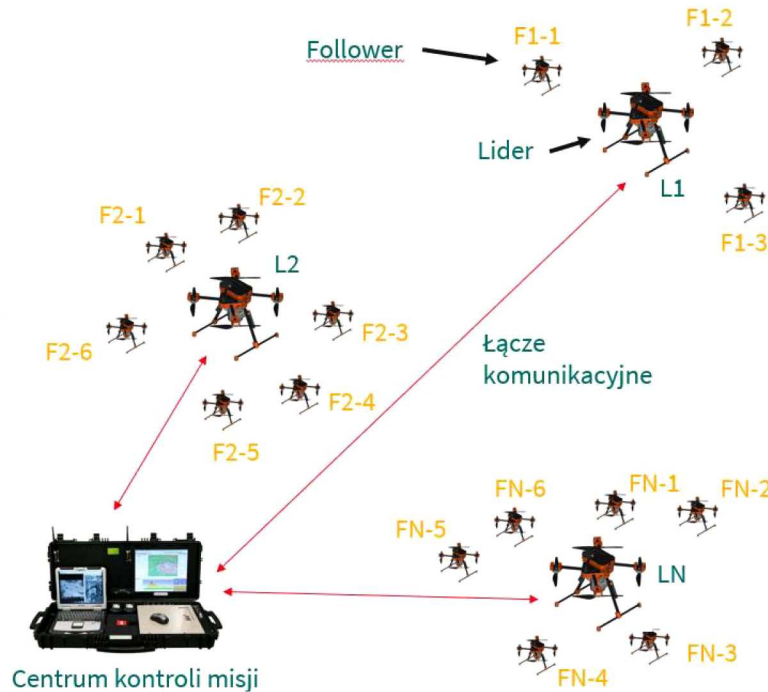
### 1. Wprowadzenie

Zagadnienie lotu w formacji bezzałogowych statków powietrznych jest w ostatnich latach obszarem intensywnych badań. Do tej pory powstało wiele różnych propozycji dotyczących tworzenia systemów złożonych z dronów i odzwierciedlających pod względem działania zachowania stadne żywych organizmów [1, 2]. Wśród nich można wymienić rozwiązania oparte zarówno na architekturach rozproszonych [3-5], jak i scentralizowanych [6]. Istnieją także różnorodne podejścia do zagadnienia algorytmów sterowania dronami poruszającymi się w formacji. Wśród nich wymienić można algorytmy ewolucyjne [7-9], metody roju cząstek [10] czy sterowanie predycyjne z modelem [11]. Prowadzone były też prace nad użyciem cyfrowych feromonów [12-14]. Technologia rojów dronów nie jest wciąż w pełni dojrzała i konieczne jest prowadzenie dalszych badań w tym obszarze [15, 16].

W niniejszej pracy przedstawiono system składający się z wielu dronów tworzących formację w powietrzu, którego przeznaczeniem jest zapewnienie łączności, głównie internetowej, na dużym obszarze objętym chwilowo jej brakiem. Sytuacja taka może być wynikiem klęski żywiołowej, takiej jak powódź czy też poszukiwań na terenach górskich czy leśnych. System taki powinien działać przez wiele godzin czy nawet dni w zależności od wymagań misji. Głównym ograniczeniem czasu działania jest pojemność akumulatora pojedynczego drona, która wynosi zazwyczaj około kilkudziesięciu minut. Dodatkowo wymagana jest dość duża autonomia działania systemu. Drony powinny być w stanie samodzielnie podejmować decyzję o opuszczeniu formacji i udaniu się do bazy w celu podładowania akumulatora, tak samo jak nowe drony powinny z bazy udawać się na miejsce działań, aby uzupełniać brakujące ogniwa w formacjach. Rola użytkownika powinna się sprowadzać do definiowania obszaru działania i ograniczeń misji oraz do nadzoru jej poprawnej realizacji.

## 2. Konfiguracja lotu w formacjach

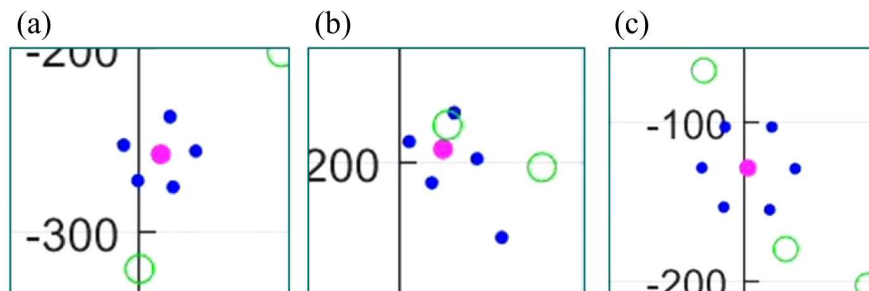
Misja realizowana jest z zastosowaniem roju dronów poruszających się w formacjach. Zasada działania roju pokazana została na rys. 1.



Rys. 1. Zasada działania roju dronów w formacjach

Rój dronów może składać się z  $N$  formacji. Każda z nich składa się z jednego Lidera i  $M$  Followerów. Lider jest dronem większym, wyposażonym w większą liczbę czujników lepszej jakości oraz dysponuje dużo większą pojemnością akumulatora w porównaniu do Followerów. Celem Lidera jest lot po zadanej przez użytkownika trasie, tak aby docelowo pokryć zadany obszar terenu. Lider odpowiada także za brak kolizji z innymi Liderami i ich formacjami. Celem Followera jest podążanie za swoim Liderem, utrzymywanie się w formacji wokół niego oraz unikanie zderzeń z pozostałymi członkami tej samej formacji. Centrum kontroli misji umożliwia śledzenie dronów, monitorowanie misji oraz wymianę dronów w przypadku niskiego stanu naładowania akumulatora lub awarii.

Same formacje są wielokątami foremnymi opartymi na okręgu i pokazane zostały na rys. 2. Kolorem fioletowym oznaczono Lidera, a kolorem niebieskim Followerów. Zielone okręgi są poszczególnymi punktami trasy, po której poruszają się Liderzy.

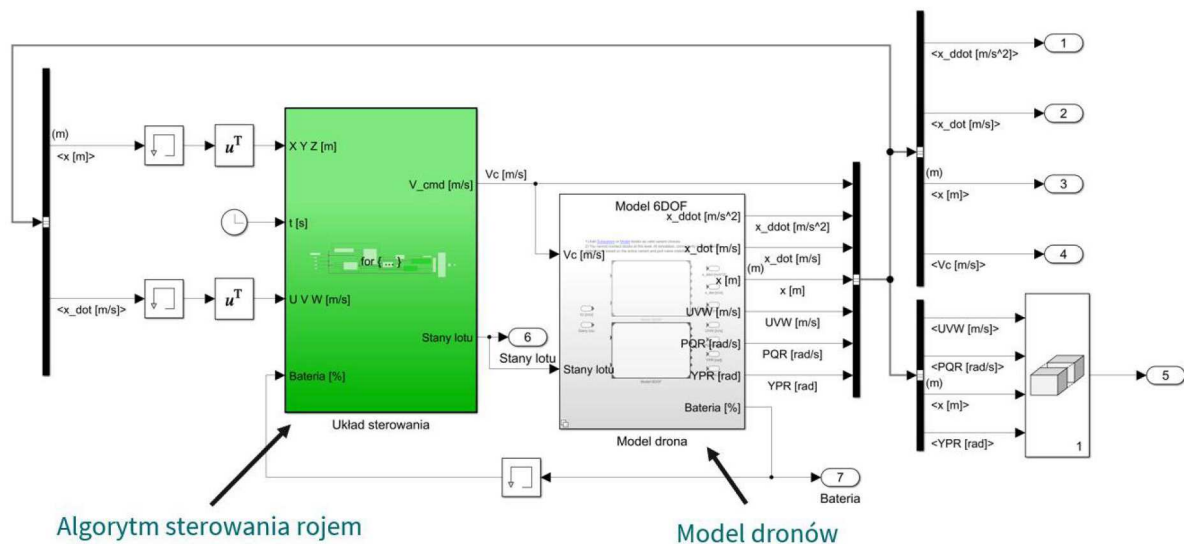


Rys. 2. Pojedyncza formacja w różnych fazach rekonfiguracji

W przypadku odłączenia się drona od formacji, pozostałe drony ustawiają się w wielokąt foremny o mniejszej liczbie wierzchołków. Ma to zapewnić utrzymanie łączności pomiędzy dronami. Zmiany z sześciokąta w pięciokąt, a następnie w kwadrat pokazane zostały rys. 2a i 2b. Na rys. 2c pokazano powrót do sześciokąta po doleceniu dronów zapasowych.

### 3. Model symulacyjny

Istotnym elementem rozwoju technologii rojów dronów są narzędzia obliczeniowe pozwalające na symulację dużej liczby obiektów latających współdziałających ze sobą. Istniejące rozwiązania takie jak SwarmLab, Gazebo, ARGoS czy AirSim [17] mają istotne ograniczenia i nie nadawały się do zaaplikowania w omawianych tutaj badaniach. Z tego powodu stworzono własne rozwiązanie w postaci symulacji numerycznej. Model symulacyjny umożliwiający lot roju dronów w formacjach został przygotowany w środowisku MATLAB/Simulink R2023a. Schemat główny modelu przedstawia rys. 3. Model składa się z dwóch głównych części: modelu dynamiki drona oraz algorytmu sterowania rojem.

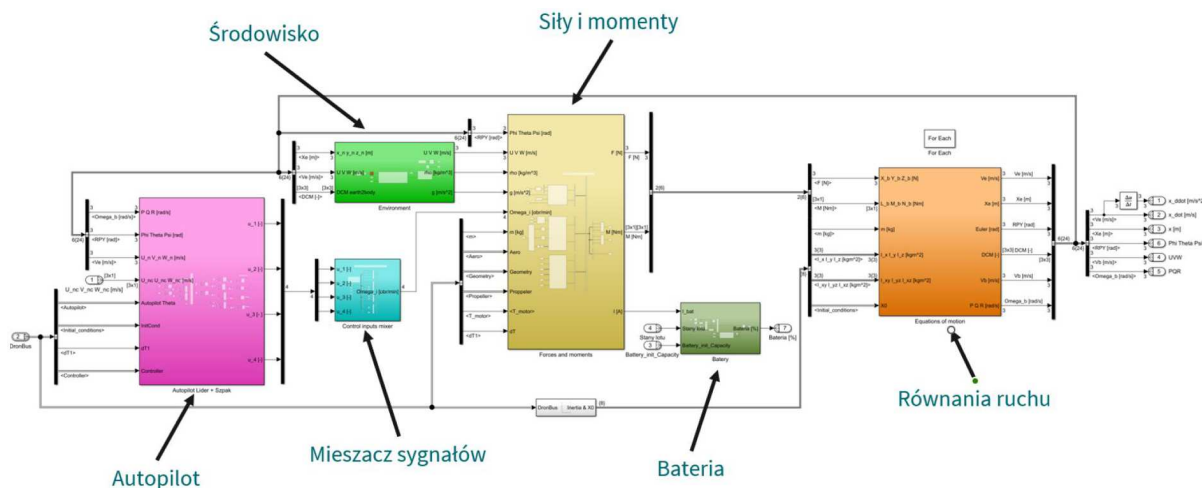


Rys. 3. Główny schemat blokowy modelu symulacyjnego

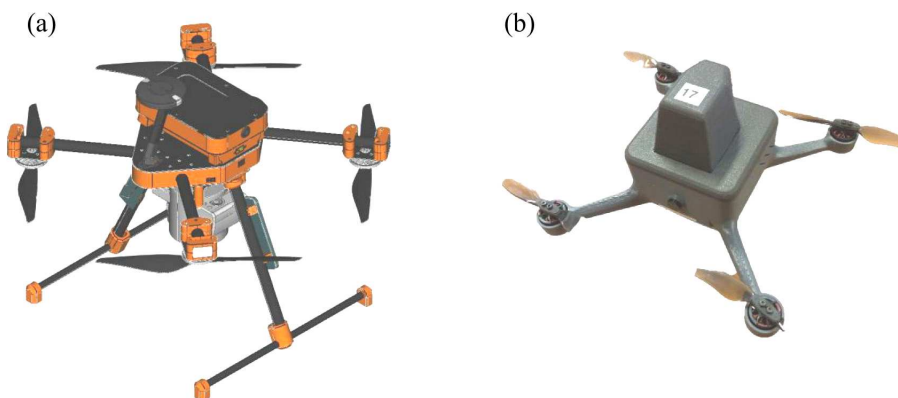
Model dynamiki drona został przedstawiony na rys. 4.

Składa się on z bloków wyznaczających siły i momenty od aerodynamiki, śmigieł nośnych i grawitacji, modelu atmosfery standardowej uwzględniającej kierunek oraz prędkość wiatru, modelu akumulatora litowo-polimerowego, a także trzykanałowego autopilota, umożliwiającego sterowanie w kanałach wysokości, odchylenia i pozycji lub prędkości. Szczegółowy opis każdego z tych podsystemów znaleźć można w [18-20]. Model dynamiki drona bazował na dwóch rzeczywistych konstrukcjach. Dron Lider (rys. 5a) ma masę około 2,2 kg oraz średnicę śmigła wynoszącą około 0,3 m. Dron Follower (rys. 5b) ma masę około 0,27 kg oraz średnicę śmigła wynoszącą około 0,1 m.

Opracowany model wraz z danymi dronów został poddany walidacji z wykorzystaniem danych uzyskanych podczas testów lotnych. Przykładowy przebieg trajektorii testowej rzeczywistej oraz symulowanej przedstawiono na rys. 6. Zauważyć można bardzo dobre odwzorowanie trajektorii testowej w symulacji.



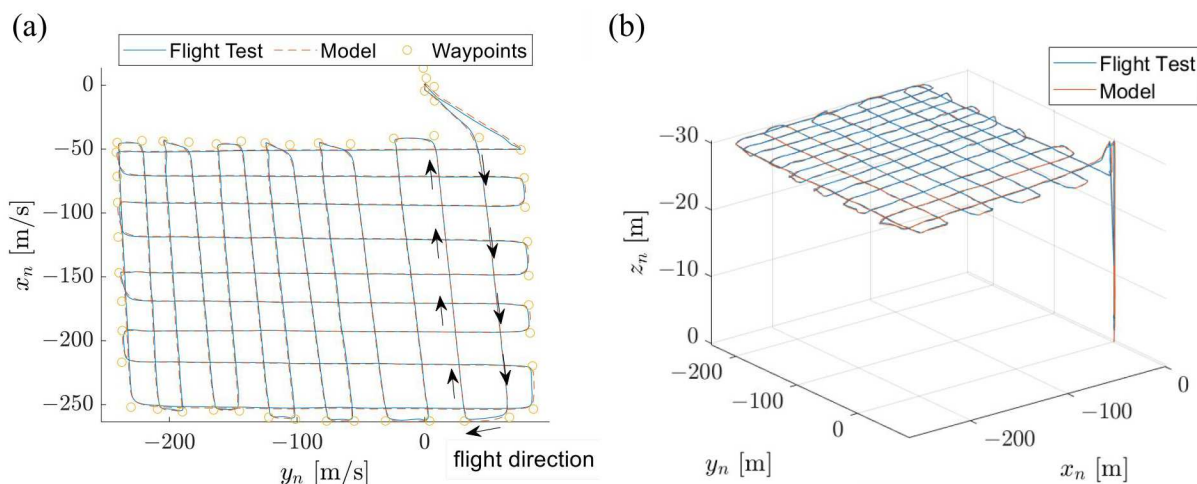
Rys. 4. Model dynamiki drona



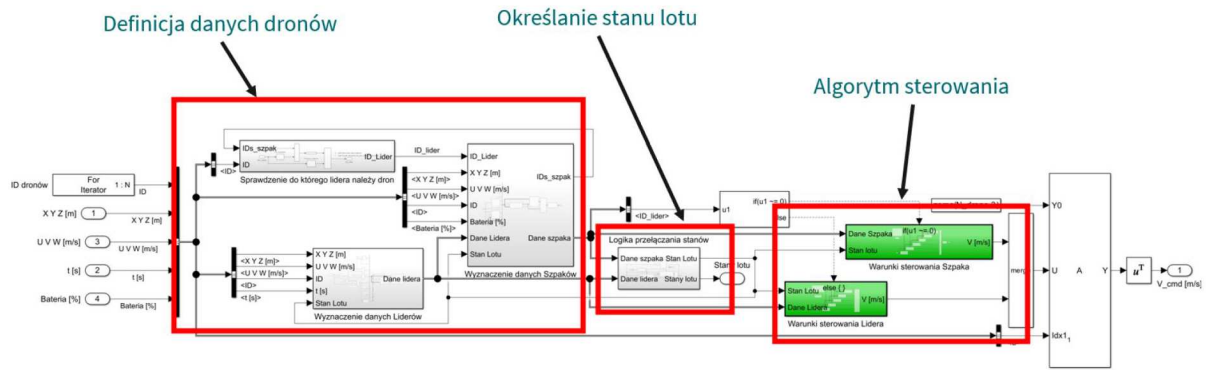
Rys. 5. Drony, których dane wykorzystano w symulacji: (a) Lider, (b) Follower

### 4. Algorytm sterowania

Blok odpowiadający za algorytm sterowania rojem podzielony został na trzy główne części, zgodnie z rys. 7.



Rys. 6. Trajektorie drona rzeczywista i symulowana podczas testów walidacyjnych: (a) rzut z góry, (b) widok ogólny



Rys. 7. Algorytm sterowania rojem

Pierwsza z nich ma charakter czysto programistyczny, jej zadaniem jest przekazanie odpowiednim dronom informacji, których potrzebują. Lider wymaga informacji o swoim położeniu i prędkości, punktach swojej trasy oraz położeniu innych Liderów, w celu unikania kolizji z nimi i ich formacjami w trakcie lotu. Follower również potrzebuje informacji o swoim położeniu i prędkości, o położeniu innych Followerów w obrębie swojej formacji oraz danych samej formacji, liczby wierzchołków wielokąta, jej wielkości oraz orientacji.

Lot każdego drona został podzielony na stany lotu, osobne dla Lidera i Followera. Wykaz stanów dla obu rodzajów dronów przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Stany lotu Lidera i Followera

Nr	Stan Lidera	Stan Followera
0	Lot w formacji	
1	Start	
2	Lądowanie	
3	Awaria	
4	Oczekiwanie	
5	–	Lot do Lidera
6	Powrót do bazy	Powrót do bazy

Lot w formacji jest stanem podstawowym. Lider, będąc w tym stanie, przemieszcza się po zadanych punktach trasy. W każdym punkcie Lider może także oczekiwać przez pewien czas przed przemieszczeniem się do kolejnego punktu. Followerzy w tym stanie poruszają się w formacji i lecą za swoimi Liderami. Start jest stanem, od którego rozpoczyna się misja wszystkich dronów. Będąc w tym stanie, drony oczekują w bazie na start, po otrzymaniu sygnału startu wznoszą się pionowo do góry, po czym Lider udaje się do punktu postojowego, w którym oczekuje na dołączenie do niego Followerów i utworzenie przez nich formacji. Lądowanie jest stanem, w którym drony zniżają się do zetknięcia z ziemią. W tym czasie promień formacji wokół Liderów zmniejsza się zachowując nadal bezpieczne odległości między dronami. Awaria jest stanem czysto symulacyjnym. Jest to stan, w którym dron nie jest brany pod uwagę w dalszych obliczeniach. Będąc w stanie oczekiwania, drony czekają w bazie na sygnał do startu. Stany lot do Lidera i powrót do bazy są stanami rekonfiguracyjnymi. W przypadku wykrycia, że poziom akumulatora jest niski, dron odłącza się od formacji i wraca do bazy, a w tym czasie nowy dron startuje, podążając do swojej przypisanej formacji. Algorytm sterowania rojem bazuje na dwóch metodach ogólnie używanych przy symulacji ruchów stadnych. Pierwszym z nich jest algorytm Reynoldsa [21]. Jest to zbiór prostych warunków, takich jak trzymanie wspólnego kierunku lotu, lot w grupie i unikanie kolizji [22], który pozwala grupie obiektów zachowywać się jak stado, czy rój. Kolejnym algorytmem są cyfrowe feromony [12]. Są to pola, które albo przyciągają,

albo odpychają od siebie obiekty, pozwalając im lecieć do wspólnego celu czy unikać miejsc niebezpiecznych, czy zabronionych.

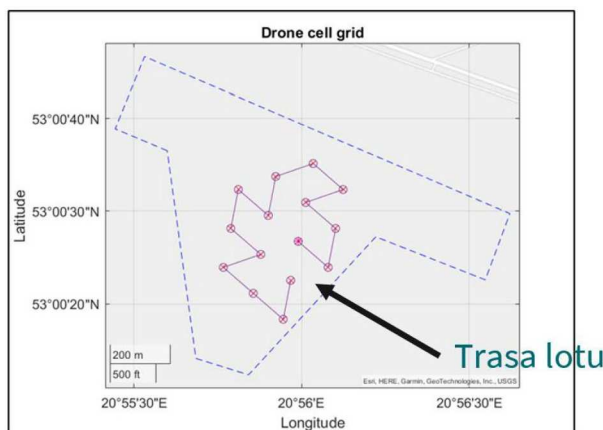
Bazując na obu algorytmach, zaprojektowano zbiór zasad sterujących lotem roju w formacjach, które dla obu typu dronów, wraz z opisem działania, przedstawia tabela 2.

**Tabela 2.** Algorytmy sterowania rojem

Reguła	Opis dla Lidera	Opis dla Followera
Wyrównanie	Poruszanie się ze średnią prędkością wszystkich Liderów	Poruszanie się ze średnią prędkością swojego Lidera
Kohezja	Poruszanie się w grupie	Poruszanie się w stronę swojego Lidera
Separacja	Brak kolizji między Liderami i ich formacjami	Brak kolizji z Followerami w obrębie własnej formacji
Unikanie kolizji	Brak kolizji ze znanymi przeszkodami terenowymi	Brak kolizji ze znanymi przeszkodami terenowymi
Namierzanie	Podążanie za kolejnymi punktami trasy	Lot do Lidera lub powrót do bazy w ramach rekonfiguracji
Formacja	–	Utrzymywanie zadanego dystansu w ramach swojej formacji

## 5. Scenariusze symulacyjne

Przygotowano dwa scenariusze symulacyjne. Pierwszy z nich miał za zadanie pokazanie możliwości pokrycia zadanego terenu rojem dronów w formacjach, tak aby odległości między dronami były możliwie stałe. Trasa składała się z 15 punktów, więc wymagała 15 Liderów do pokrycia w całości. Każda z formacji składała się z 6 Followerów. Trasę lotu przedstawiono na rys. 8.

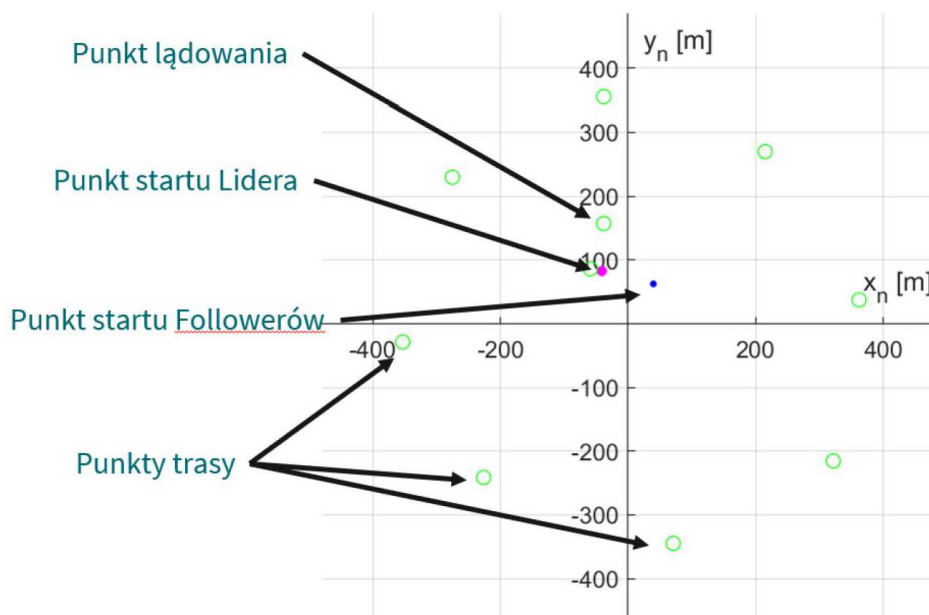


Rys. 8. Trasa lotu pierwszego scenariusza symulacyjnego

Lot odbywał się w postaci „węża”, kolejne formacje startowały w odpowiednich odstępach czasowych i leciały do kolejnych punktów na trasie. W każdym punkcie formacji czekały przez pewien czas, tak aby zachować jak najlepszą płynność ruchu. W celu realizacji unikania kolizji pomiędzy kolejnymi formacjami, formacje parzyste i nieparzyste leciały na innych wysokościach. Po pokryciu całego obszaru drony miały udać się do miejsca lądowania i tam wylądować.

Scenariusz drugi miał za zadanie pokazać możliwość rekonfiguracji Followerów w przypadku zejścia poniżej zadanego progu zużycia akumulatora. W tym przypadku była tylko jedna forma-

cja złożona z Lidera i sześciu Followerów. Dodatkowo w bazie oczekiwały 24 drony rezerwowe z naładowanymi do pełna akumulatorami gotowe do przeprowadzenia rekonfiguracji. Celem misji był przelot przez 10 punktów trasy ułożonej w postaci okręgu wokół bazy oraz wykonanie rekonfiguracji dronów. Scenariusz misji pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Scenariusz misji rekonfiguracji

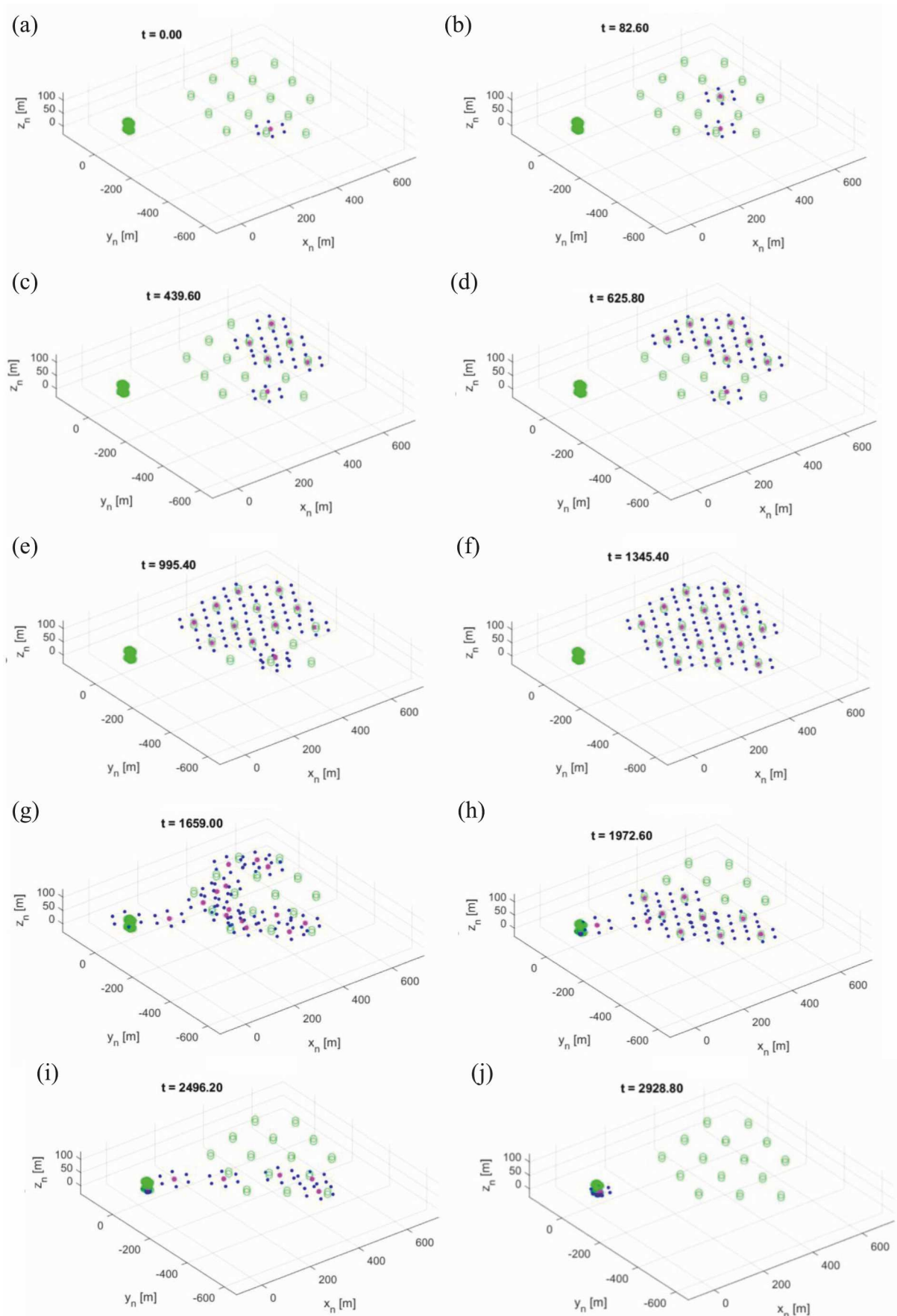
## 6. Wyniki symulacji

Na rys. 10 przedstawiono wizualizację startu, przelotu i lądowania 15 formacji dronów, wykorzystując predefiniowaną trajektorię. W tytule każdego z wykresów zaznaczono czas który upłynął od rozpoczęcia misji w sekundach.

Każda z formacji, składająca się z 1 drona Lidera oraz otaczających go 6 Followerów w konfiguracji sześciokąta, precyzyjnie podążała wyznaczoną trasą opartą na 15 punktach w przestrzeni powietrznej i jednym punkcie startu i lądowania. Dzięki odpowiedniemu zaplanowaniu czasu startu poszczególnych formacji oraz utrzymaniu stałych odstępów i separacji wysokościowych, uzyskano płynny i ciągły ruch całej grupy, nie wystąpiły żadne kolizje. Czas do momentu wzniesienia w powietrze wszystkich dronów to 1345 sekund, a całkowity czas trwania misji to 2929 sekund. Wyniki przeprowadzonego testu potwierdziły skuteczność zastosowanych algorytmów.

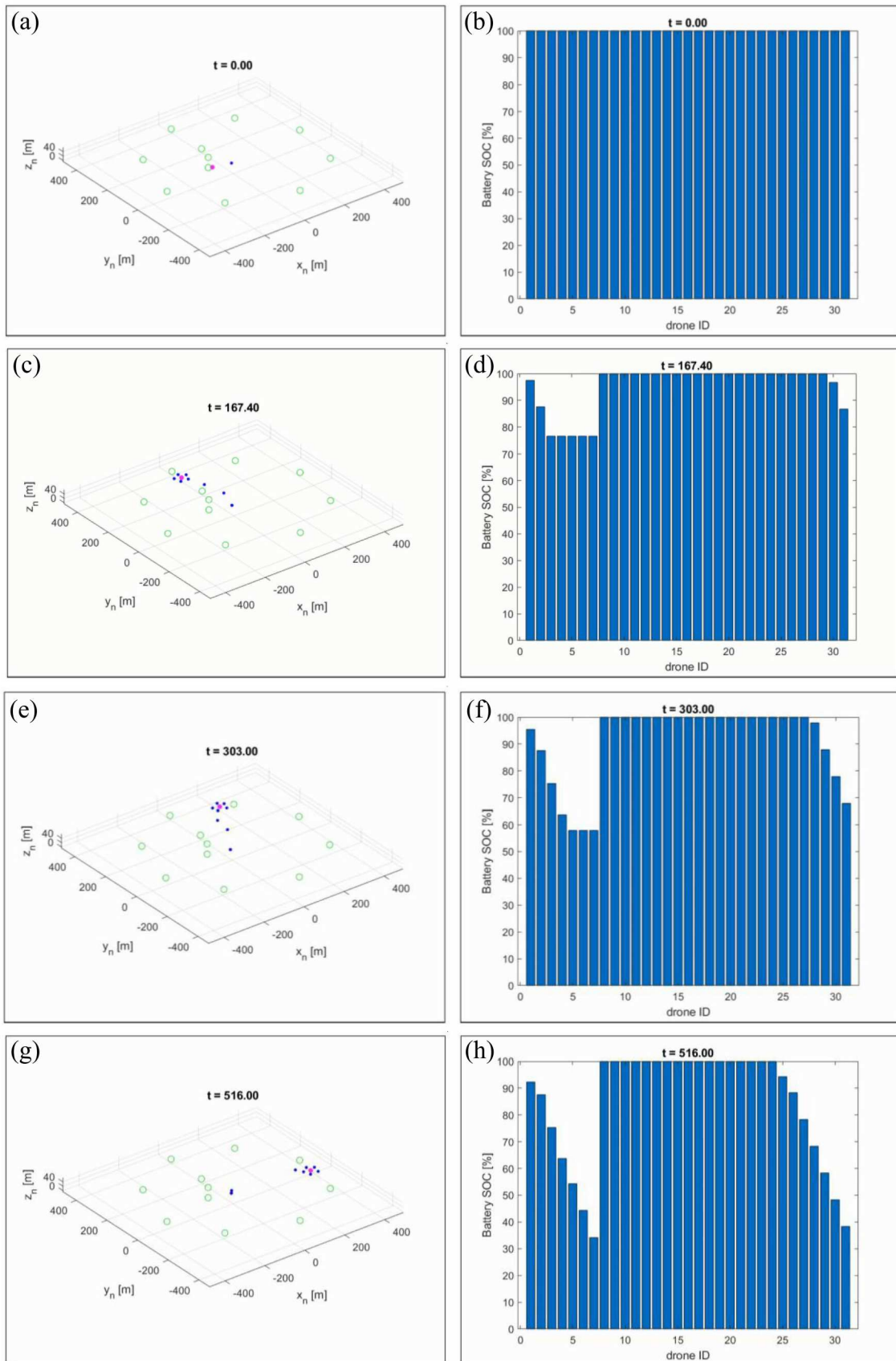
Na rys. 11 przedstawiono wyniki testu sprawdzającego skuteczność opracowanego mechanizmu rekonfiguracji formacji dronów, podczas lotu po zadanej trajektorii, w warunkach dynamicznie zmieniającego się poziomu naładowania akumulatorów.

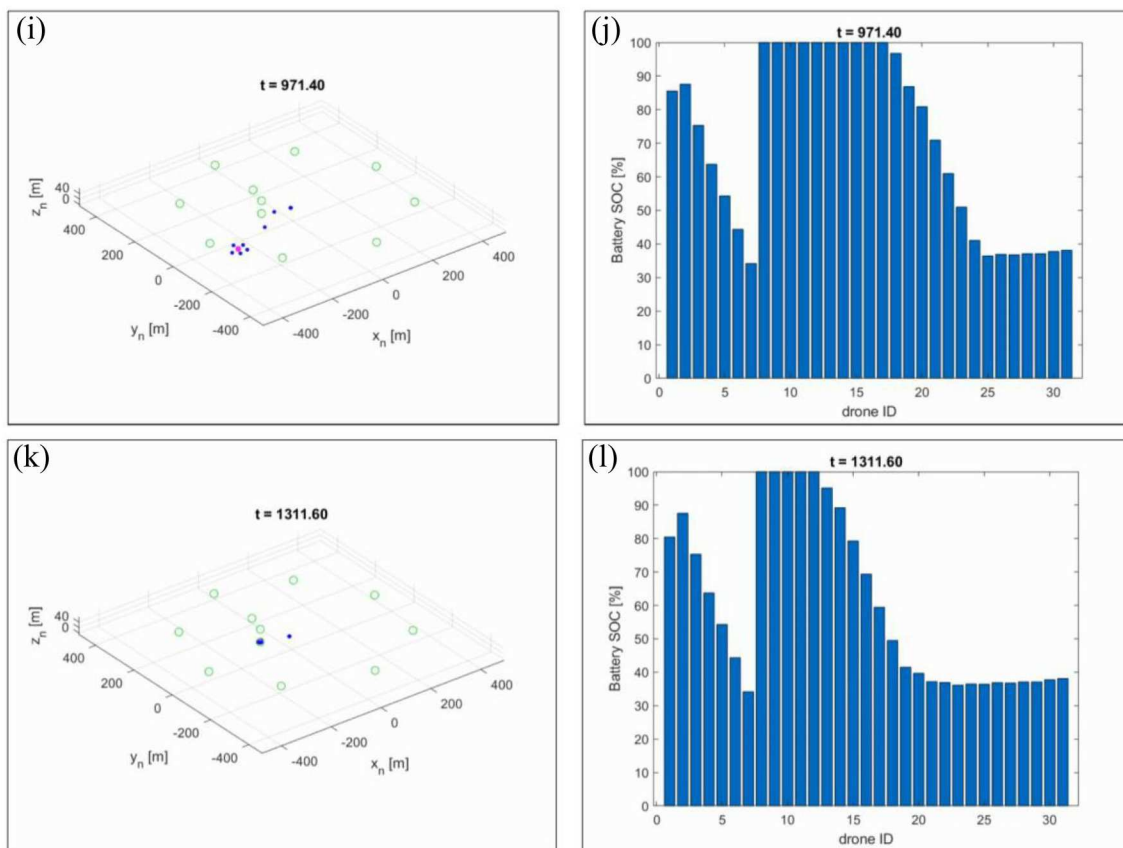
Pojedyncza formacja, składająca się z Lidera i sześciu Followerów, zrealizowała zadanie przelotu po zadanej trajektorii kołowej. Formacja utrzymywała kształt sześciokąta, podczas rekonfiguracji jedno miejsce pozostawało puste w oczekiwaniu na drona z naładowanym akumulatorem. Automatyczny proces zastępowania dronów z rozładowanymi akumulatorami przez jednostki z pełnym naładowaniem przebiegł bez zakłóceń, co świadczy o efektywności algorytmów sterowania. Brak kolizji zarówno podczas manewrów rekonfiguracji, jak i w trakcie lotu, potwierdza poprawność zaprojektowanych procedur unikania kolizji. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zastosowania przedstawionego rozwiązania w bardziej złożonych scenariuszach, wymagających dynamicznej adaptacji struktury formacji do zmieniających się warunków środowiskowych i celów misji.



Rys. 10. Wyniki scenariusza pierwszego







Rys. 11. Wyniki scenariusza drugiego

## 7. Podsumowanie

W ramach prac stworzona została generyczna i skalowalna komputerowa symulacja lotu roju dronów w środowisku MATLAB/Simulink. Model matematyczny dronów został częściowo zwalidowany na podstawie wyników testów w locie. Wyniki symulacji wskazują, iż reguły sterowania poszczególnych dronów działają poprawnie. Opracowane narzędzie obliczeniowe może być zastosowane w praktyce przy planowaniu testów w locie rzeczywistych dronów. Ponadto analiza zebranych danych pozwala na dalszą optymalizację systemu, w szczególności pod kątem zużycia energii oraz odporności na zakłócenia zewnętrzne.

Prace badawcze finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu: „Opracowanie zaawansowanej technologii autonomicznych rojów dronów na potrzeby cyfrowego zabezpieczenia infrastruktury krytycznej, doraźnej aplikacji inspekcyjnej i innowacyjnej rozrywki kreatywnej”, PO-IR.04.01.04?00?0078/20, 01.01.2023-31.12.2023.

## Bibliografia

1. COHEN S., AGMON N., Recent advances in formations of multiple robots, *Curr. Robot. Reports*, **2**, 2, 159-175, 2021, DOI: 10.1007/s43154-021-00049-2
2. CAMPION M., RANGANATHAN P., FARUQUE S., UAV swarm communication and control architectures: A review, *J. Unmanned Veh. Syst.*, **7**, 2, 93-106, 2019, DOI: 10.1139/juvs-2018-0009

3. TOKSZ M.A., OĞUZ S., GAZI V., Decentralized formation control of a swarm of quadrotor helicopters, *IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA*, **2019-July**, September, 1006-1013, 2019, DOI: 10.1109/ICCA.2019.8899628
4. ALONSO-MORA J., MONTIJANO E., NGELI T., HILLIGES O., SCHWAGER M., RUS D., Distributed multi-robot formation control in dynamic environments, *Auton. Robots*, **43**, 5, 1079-1100, 2019, DOI: 10.1007/s10514-018-9783-9
5. OLFATI-SABER R., Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **51**, 3, 401-420, 2006, DOI: 10.1109/TAC.2005.864190
6. OWEIS S., GANESAN S., CHEOK K.C., Server based control flocking for aerial-systems, *IEEE Int. Conf. Electro Inf. Technol.*, June, 314-319, 2014, DOI: 10.1109/EIT.2014.6871783
7. STOLFI D.H., DANROY G., An evolutionary algorithm to optimise a distributed UAV swarm formation system, *Appl. Sci.*, **12**, 20, 2022, DOI: 10.3390/app122010218
8. LAMONT G.B., SLEAR J.N., MELENDEZ K., UAV swarm mission planning and routing using multi-objective evolutionary algorithms, *Proc. 2007 IEEE Symp. Comput. Intell. Multicriteria Decis. Making, MCDM 2007*, 10-20, 2007, DOI: 10.1109/MCDM.2007.369410
9. LÓPEZ-GONZÁLEZ A., MEDA CAMPAÑA J.A., HERNÁNDEZ MARTÍNEZ E.G., CONTRO P.P., Multi robot distance based formation using Parallel Genetic Algorithm, *Appl. Soft Comput. J.*, **86**, 105929, 2020, DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105929
10. PYKE L.M., STARK C.R., Dynamic pathfinding for a swarm intelligence based UAV control model using particle swarm optimisation, *Front. Appl. Math. Stat.*, **7**, November, 1-16, 2021, DOI: 10.3389/fams.2021.744955
11. DUNBAR W.B., MURRAY R.M., Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations, *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, **4**, December, 4631-4636, 2002, DOI: 10.1109/cdc.2002.1185108
12. VAN DYKE PARUNAK ALTARUM H., PURCELL M., O'CONNELL R., Digital pheromones for autonomous coordination of swarming UAV'S, *1st UAV Conf.*, 1-9, 2002, DOI: 10.2514/6.2002-3446
13. SAUTER J.A., MATTHEWS R., VAN DYKE PARUNAK H., BRUECKNER S.A., Performance of digital pheromones for swarming vehicle control, *Proc. Int. Conf. Auton. Agents*, 1037-1044, 2005, DOI: 10.1145/1082473.1082610
14. SANNIER A., REINERS D., OLIVER J., UAV swarm control: calculating digital pheromone fields with the GPU, *J. Def. Model. Simul. Appl. Methodol. Technol.*, **3**, 3, 167-176, 2006, DOI: 10.1177/154851290600300304
15. DERENICK J.C., SPLETZER J.R., Convex optimization strategies for coordinating large-scale robot formations, *IEEE Trans. Robot.*, **23**, 6, 1252-1259, 2007, DOI: 10.1109/TRO.2007.909833
16. PSYCHOLOGY E., ERGONOMICS C., VERSION D., PSYCHOLOGY E., ERGONOMICS C., *The Design Challenges of Drone Swarm Control*, 2022, Springer, DOI: 10.1007/978-3-030-77932-0
17. SORIA E., SCHIANO F., FLOREANO D., SwarmLab: A Matlab drone swarm simulator, *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, 8005-8011, 2020, DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340854
18. JACEWICZ M., ŻUGAJ M., GŁĘBOCKI R., BIBIK P., Quadrotor model for energy consumption analysis, *Energies*, **15**, 19, 7136, Oct. 2022, DOI: 10.3390/EN15197136/S1
19. JACEWICZ M., GŁĘBOCKI R., MIEDZIŃSKI D., Opracowanie i walidacja modelu symulacyjnego quadrotora na potrzeby analizy wykorzystania energii podczas lotu, [W:] *Mechanika w Lotnictwie, ML-XX 2022*, K. Sibilski, P. Lichota (Red.), ZG PTMTS, Warszawa, 2023, DOI: 10.15632/ml2022/145-163
20. GŁĘBOCKI R., ŻUGAJ M., JACEWICZ M., Validation of the energy consumption model for a quadrotor using Monte-Carlo simulation, *Arch. Mech. Eng.*, **70**, 1, 151-178, 2023, DOI: 10.24425/ame.2022.144075
21. REYNOLDS C.W., Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model, *Comput. Graph.*, **21**, 4, 25-34, 1987, DOI: 10.1145/37402.37406

22. ALFEO A.L., CIMINO M.G.C.A., DE FRANCESCO N., LAZZERI A., LEGA M., VAGLINI G., Swarm coordination of mini-UAVs for target search using imperfect sensors, *Intell. Decis. Technol.*, **12**, 2, 149-162, 2018, DOI: 10.3233/IDT-170317

**Simulator of a swarm of drones flying in formations taking into account battery consumption**

The following article presents a numerical simulation of flight of a drone swarm providing communication in a designated area. The control algorithm is based on the Reynolds method and digital pheromones. Exemplary simulation scenarios are presented, consisting of the flight of successive formations along the given track, with particular consideration of the battery charge level in successive drones. The created simulation model allows for planning missions and preparing flight tests of the real system.