

# Identyfikacja parametrów człowieka

Antoni Kopyt, Robert Głębocki

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Politechnika Warszawska

**Streszczenie:** W pracy została przedstawiona metoda identyfikacji parametrów człowieka, którego zadaniem było śledzenie zadanej trajektorii. Do doświadczenia został wykorzystany pakiet MATLAB/Simulink, w którym został napisany interfejs pozwalający na przeprowadzenie prób oraz analizę wyników. Do celów identyfikacji został wykorzystany System Identification Toolbox – narzędzie dostępne w pakiecie MATLAB. Celem pracy było dobranie właściwych parametrów liniowego modelu człowieka działającego w układzie z joystickiem. W pracy zostały wykazane zależności w reakcji człowieka, jakie pojawiają się dla różnych częstotliwości wymuszeń. Końcowym efektem doświadczenia jest wygenerowany uśredniony model operatora, który może służyć do dalszych prac nad współdziałaniem układów człowiek-maszyna.

**Słowa kluczowe:** człowiek, identyfikacja, model, transmitancja operatorowa

## 1. Wprowadzenie

Model matematyczny człowieka może być bardzo cenny dla inżynierów analizujących działanie układu operator-maszyna. Przeprowadzanie różnego rodzaju symulacji nie tylko samego obiektu sterowanego, ale również jego operatora może umożliwić formułowanie wniosków dotyczących działania obiektu oraz jego współpracy z człowiekiem. Mimo wielu badań nad modelem operatora nie sformułowano dotąd jednego uniwersalnego modelu, gdyż każdy człowiek jest inny i może zachowywać się różnie w tych samych warunkach, w odróżnieniu od działania konkretnego urządzenia [1].

Charakterystyczną cechą człowieka jest możliwość adaptacji (uczenia się) nie tylko do danego urządzenia, ale również do konkretnych warunków, w jakich człowiek ma operować (np. różne rodzaje aut, albo różne warunki pogodowe). W wielu pracach stwierdzono, że człowiek dostosowuje się dość szybko do urządzenia sterowanego, czyli jakość sterowania szybko się stabilizuje na zadawalającym poziomie. Adaptacja człowieka do sterowanego urządzenia jest jego główną cechą, która odróżnia go od innych układów dynamicznych [2]. Podstawową trudnością w modelowaniu człowieka jest brak powtarzalności w jego zachowaniu, ponieważ z natury człowiek jest układem niestacjonarnym. Jest to kolejna cecha, która odróżnia działanie człowieka od działania maszyny. Z punktu widzenia sterowania, zaprojektowane urządzenie przy danych warunkach będzie miało określoną charakterystykę. Człowiek natomiast przy tych samych warunkach pracy może mieć zmienne parametry. Wynika to przede wszystkim ze względu na jego predyspozycje do nauki oraz wpływ takich bodźców jak stres lub zmęczenie. Dodatkowe różnice wynikają również z innych aspektów fizycznych ludzi [3].

Wymienione elementy powodują, że określenie jednego konkretnego modelu, który dałby się zastosować w wielu różnych układach, jest nierealne. Podczas identyfikacji parametrów człowieka należy mieć na względzie przede wszystkim różnice ludzi w sposobie reagowania na zadane bodźce. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę fakt, że człowiek, sterując urządzeniem, z czasem nabiera doświadczenia i jego działanie staje się coraz lepsze z każdą kolejną próbą.

## 2. Model dynamiki człowieka

Aby prawidłowo zamodelować działanie człowieka należy wcześniej szczegółowo zapoznać się z jego możliwościami oraz ograniczeniami. Bez względu na urządzenie, jakim operator ma sterować, można wyszczególnić pewne jego cechy i wskazać zakres ich pracy. Niemal we wszystkich proponowanych modelach, jakie są opisywane w literaturze, występuje czas reakcji człowieka. Jest to czas, który upływa od momentu spostrzeżenia danej zmiany (zmysł wzroku), uwzględniający proces przekazywania sygnału do Centralnego Układu Nerwowego, gdzie podejmowana jest decyzja oraz przekazywanie sygnału do elementu wykonawczego (np. ręki), którą człowiek wykonuje ruch. Cały ten proces trwa w przybliżeniu około 0,4 s. [4].

Na podstawie prac [5] w niniejszym opracowaniu przyjęto liniowy model operatora o postaci:

$$H(s) = \frac{K(1 + T_z s)e^{-T_d s}}{(T_w^2 s^2 + 2\zeta T_w s + 1)} \quad (1)$$

gdzie odpowiednio:

$H(s)$  – transmitancja operatorowa człowieka,

$\zeta$  – współczynnik tłumienia,

$1/T_w$  – częstotliwość własna,

$K$  – wzmocnienie,

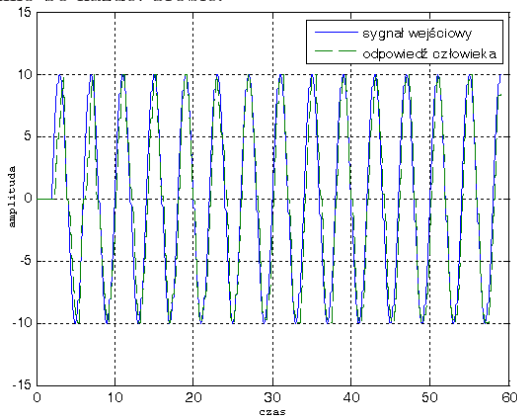
$T_z$  – czas wyprzedzenia,

$T_d$  – czas reakcji.

## 3. Doświadczenie

Celem doświadczenia było zebranie niezbędnych danych potrzebnych do identyfikacji modelu człowieka. Operator miał za zadanie podążać za zadanym sygnałem (sinusoida) poruszając drążkiem w jednej płaszczyźnie (górze-dół). W programie MATLAB/Simulink został zaprojektowany program, pozwalający na śledzenie zadanego sygnału. Jest to zadanie często wykorzystywane podczas analizowania działania układu człowiek-maszyna [5, 6, 7]. Program Simulink generuje i przetwarza sygnały w bardzo krótkim czasie. Aby ćwiczenie

było zgodne z założeniami, należało spowolnić jego działanie, tak by obraz pojawiał się na ekranie w czasie rzeczywistym. Korzystając z modułu Real-Time oraz dokonując niezbędnych zmian w kodzie, założenie to udało się spełnić. Sygnał z joysticka oraz zadane wymuszenie pojawiało się na ekranie jako dwa różnego koloru przebiegi. Danymi wyjściowymi z programu były: czas symulacji, wymuszenie oraz odpowiedź człowieka. Dane te były zapisywane bezpośrednio po każdej próbie.



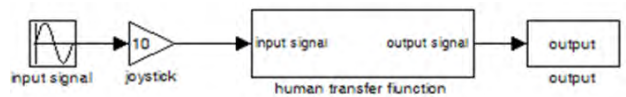
Rys. 1. Zapis doświadczenia  
Fig. 1. Experiment data

Przed dokonaniem właściwych pomiarów operator musiał nauczyć się sterować dżoystickem. Do ćwiczeń wstępnych został wykorzystany program, którego zasada działania jest identyczna jak w programie docelowym, z tą różnicą, że sygnał generowany był losowo, a czas symulacji dowolny. Przez kilka minut operator mógł zapoznać się z dynamiką urządzenia oraz z formą wyświetlania wyników na ekranie.

Przed rozpoczęciem symulacji należało ręcznie wybrać częstotliwość, dla jakiej miała być przeprowadzona próba. Ćwiczenie zostało powtórzone kilka razy przy zmiennej częstotliwości sygnału wejściowego. Zakres badanych częstotliwości wynosił od 0,1 Hz do 1 Hz. We wszystkich próbach amplituda sygnału wejściowego była stała, niewiele mniejsza niż maksymalne wychylenie joysticka. Wymuszenie było opóźnione o 2 s, tak aby operator zdążył się przygotować do danego ćwiczenia. Częstość próbkowania wynosiła 0,01 s. Czas pojedynczego ćwiczenia wynosił 60 s. Jest to wystarczający przedział czasowy pozwalający na przeprowadzenie wielu ćwiczeń przy różnych częstotliwościach, lecz na tyle krótki, aby wynik nie był obciążony wpływem zmęczenia operatora [5, 6, 7]. Modelowanie inercji joysticka zostało pominięte, gdyż w porównaniu z opóźnieniami człowieka jest ona pomijalnie mała. W dalszej analizie joysticka został potraktowany jako człon proporcjonalny. Wynik każdej próby był następnie przekształcany do postaci wymaganej do dalszej analizy. W przypadku, gdy któraś z rejestracji była ewidentnie zaburzona przez gwałtowne ruchy operatora bądź też przez jego nieuwagę, powtarzano ćwiczenie z uwzględnieniem tej samej częstotliwości.

#### 4. Identyfikacja parametrów

Na podstawie wyników dokonano identyfikacji parametrów modelu. Tak jak wspomniano wyżej, joystick jest trak-



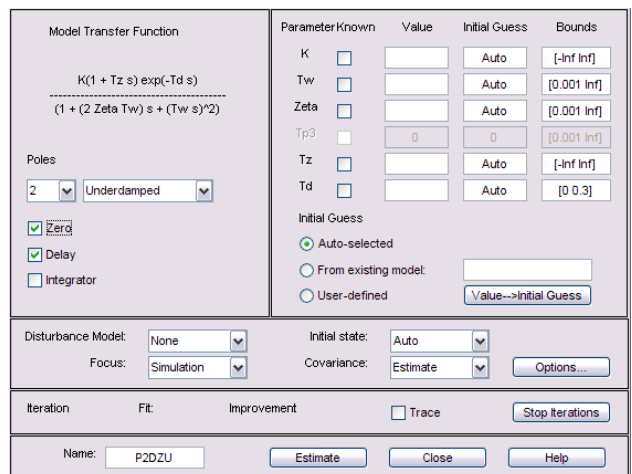
Rys. 2. Uproszczony schemat  
Fig. 2. Simplified scheme of system

towany jako człon proporcjonalny. Dynamika człowieka jest opisana za pomocą (1), sygnałem wejściowym jest zadane wymuszenie, a sygnałem wyjściowym jest ruch joysticka. Uproszczony schemat działania przedstawiono na rys. 2. Mając te dwa sygnały oraz model dynamiki operatora, można dokonać identyfikacji współczynników transmitancji operatorowej. Każda para (w zależności od częstotliwości) sygnałów wejście/wyjście była identyfikowana oddzielnie.

Dobór parametru  $T_d$  – czasu reakcji człowieka został dokonany na podstawie przebiegów otrzymanych z doświadczeń. Jest to parametr, który w bardzo prosty sposób można zaobserwować na rys. 1. Jest to różnica między czasem pierwszego ruchu dżoysticka a początkiem wymuszenia. Pozostałe współczynniki zostały dobrane za pomocą narzędzia System Identification Toolbox (SIT).

Autorzy w [5, 8] wykorzystują metodę ARX do identyfikacji parametrów transmitancji. Ta metoda daje wynik w przestrzeni  $z$ , a nie w domenie czasu. Wiąże się to z kolejnymi przekształceniami, aby dojść do wymaganej postaci (1). W narzędziu SIT jest wiele dostępnych metod między innymi ARX, ARMAX. Te metody świetnie się sprawdzają dla układów wyższych rzędów. W prezentowanym przypadku mamy do czynienia z układem inercyjnym drugiego rzędu połączonym z członem różniczkującym. Fakt ten pozwolił na wykorzystanie innej formy identyfikacji, znacznie upraszczającej matematyczne przekształcenia. Wyniki, jakie otrzymano korzystając z tej metody są zbliżone z wynikami [5]. Można więc uznać, że metoda ta daje dobre wyniki w tego rodzaju doświadczeniu.

Metoda „Process Models” (rys. 3) pozwala na identyfikację modelu bezpośrednio w postaci (1). Przed rozpoczęciem identyfikacji, należy określić charakter transmitancji – liczbę zer, biegunów oraz opóźnienie układu, podając zakresy wszystkich współczynników jakie występują w danym modelu. Dla każdej badanej częstotliwości została wyznaczona



Rys. 3. Okno identyfikacji parametrów  
Fig. 3. Identification menu

transmitancja. Otrzymane modele zostały następnie wysłane do programu głównego. W nim modele zostały przekształcone do postaci, jaka jest wymagana do dalszej analizy.

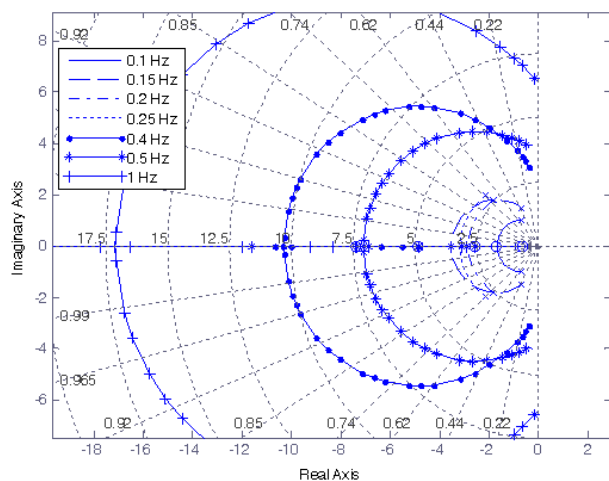
### 5. Analiza wyników

Na poniższym zestawieniu (tab. 1) widać, że jakość odpowiedzi człowieka maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Współczynnik  $\zeta$ , odpowiedzialny za tłumienia, znacząco spada przy częstotliwości 0,4 Hz. Wzmocnienie  $K$  również maleje. Dla częstotliwości wyższych niż 0,4 Hz współczynnik tłumienia jest bliski zera, a odpowiedź człowieka staje się coraz bardziej oscylacyjna i mniej stabilna.

Tab. 1. Wartości współczynników modelu

Tab. 1. Model coefficient values

Częstotliwość [Hz]	$K$	$T_w$	$\zeta$	$T_d$	$T_z$
0,1	0,67	0,80	0,58	0,66	1,49
0,15	0,72	0,60	0,43	0,51	0,58
0,2	0,52	0,39	0,71	0,60	1,32
0,25	0,44	0,34	0,73	0,42	1,33
0,4	0,35	0,32	0,12	0,39	0,20
0,5	0,25	0,25	0,12	0,58	0,38
1	0,05	0,15	0,02	0,41	0,14



Rys. 4. Bieguny i zera transmitancji

Fig. 4. Poles and zeros of the transfer function

Taki wynik doświadczenia jest zgodny z oczekiwaniami, gdyż człowiek ma swoje ograniczenia wynikające z warunków fizycznych. Przy pewnych częstotliwościach nie jest on w stanie dokładnie podążać za zadanym sygnałem. Przy coraz częstszych wymuszeniach czas wyprzedzenia stopniowo maleje. Wynika to z faktu, że operator szybko dostosowuje się do wymuszenia i reaguje na nie w krótszym czasie. Wpływa to jednak negatywnie na resztę parametrów. Czas reakcji oscyluje wokół zakładanej wartości 0,4 s.

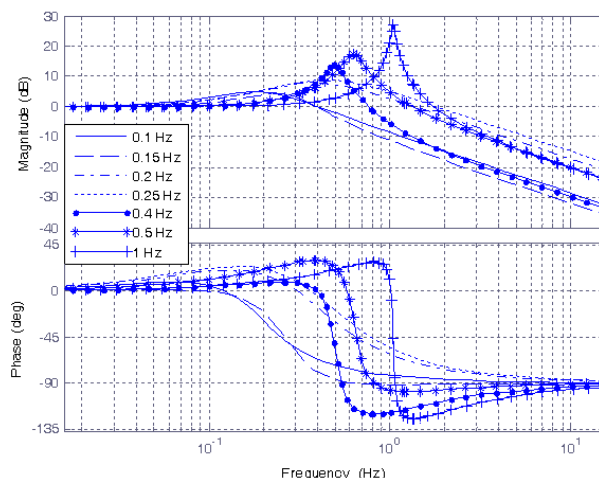
Z tab. 2 przedstawiającej zera i bieguny transmitancji oraz z rys. 4 przedstawiającego linie pierwiastkowe wynika, że bieguny transmitancji dla coraz większych częstotliwości zbliżają się do zera, co wraz z małym współczynnikiem tłumienia  $\zeta$ , znacząco wpływa na coraz mniejszą stabilność układu. Przy częstotliwościach w okolicach 1 Hz reakcja człowieka jest już zbyt wolna i jego odpowiedź staje się niestabilna. Obserwując zależności między parametrami można wywnioskować, że w przypadku częstotliwości mniejszych niż 0,1 Hz  $\zeta$  będzie większe niż 1, tym samym układ nie będzie oscylacyjny. Wynika to z faktu, że bieguny są coraz bliżej osi rzeczywistej.

Tab. 2. Bieguny i zera transmitancji

Tab. 2. Poles and zeros of the transfer function

Częstotliwość [Hz]	Bieguny	Zera
0,1	-0,7292 +/- 1,0150i	-0,6683
0,15	-0,7156 +/- 1,5000i	-1,726
0,2	-1,8164 +/- 1,7948i	-0,7583
0,25	-2,1400 +/- 1,9936i	-0,7492
0,4	-0,3739 +/- 3,1088i	-4,857
0,5	-0,4986 +/- 3,9669i	-2,59
1	-0,1908 +/- 6,5615i	-7,369

Na wykresach przedstawiających charakterystyki Bodego zaprezentowanych na rys. 5 widać wpływ zmniejszającego się współczynnika tłumienia. Powyżej częstotliwości 0,4 Hz układ szybko traci stateczność. Widać jednak, że wraz ze



Rys. 5. Charakterystyki Bodego

Fig. 5. Bode plots

wzrostem częstotliwości wymuszenia człowiek dostosowuje się i może pracować z większymi częstotliwościami.

Poniżej podano zestawienie odpowiedzi dwóch skrajnych układów (odpowiednio dla 0,1 Hz i 1 Hz) na wymuszenie jednostkowe. W tab. 3 zostały wyszczególnione podstawowe charakterystyki odpowiedzi.

Tab. 3. Wskaźniki regulacji

Tab. 3. System response properties

Częstotliwość [Hz]	Przeregulowanie	Czas regulacji [s]	Czas narastania [s]
0,1	1,51	4,9	0,408
1	2,23	15,7	0,104

Warto zwrócić uwagę, że czas narastania dla częstotliwości 1 Hz jest znacznie krótszy od drugiego układu. Przy tak dużych oscylacjach ( $\zeta = 0,02$ ) oraz wysokim przeregulowaniu (122 %) jakość tej odpowiedzi jest nieakceptowalna.

Można przyjąć, że w zakresie od 0,1 Hz do 0,4 Hz parametry transmitancji są do siebie zbliżone. Większość współczynników w tym zakresie różni się od siebie nieznacznie. Świadczy to więc, że najlepsza odpowiedź człowieka w zadaniu śledzenia (ang. tracking task) będzie optymalna w zakresie mniejszym niż 0,4 Hz. Biorąc to pod uwagę, dla małych częstotliwości można przyjąć jeden ogólny model, którego parametry zostały obliczone za pomocą średniej arytmetycznej.

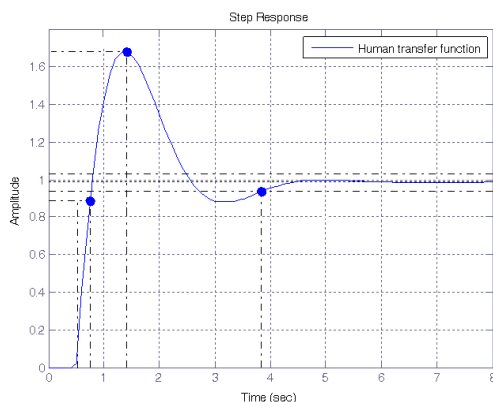
$$H(s) = \frac{0,54(1 + 0,98s)e^{-0,51s}}{(0,2401s^2 + 0,5037s + 1)} \quad (3)$$

Nowe parametry modelu podano w tab. 4. Współczynnik  $T_d$  jest bliski do zakładanego w [1, 2]. Analizując wartości własne mianownika transmitancji otrzymujemy dwa bieguny, które są zbieżne z wynikami otrzymanymi w [5].

Tab. 4. Nowe parametry modelu

Tab. 4. Averaged parameters of new model

Częstotliwość [Hz]	$K$	$T_w$	$\zeta$	$T_d$	$T_z$
<0,4	0,54	0,49	0,51	0,51	0,98



Rys. 6. Odpowiedź skokowa nowego modelu

Rys. 6. New model step response

Właściwości otrzymanej transmitancji są zaprezentowane w postaci odpowiedzi na wymuszenie skokowe na rys. 6.

Wskaźniki regulacji zaprezentowane w tab. 5 otrzymanego modelu są akceptowalne. Czas regulacji poniżej 4 s jest wynikiem satysfakcjonującym. Charakter dopowiedzi skokowej cechuje się dość krótkim czasem narastania oraz 60 % przeregulowaniem. Niemniej jednak taki model nadaje się do dalszych prac wykorzystujących człowieka jako elementu w bardziej skomplikowanych układach, zakładając w nich podobny charakter wymuszenia.

Tab. 5. Wskaźniki regulacji nowego modelu

Tab. 5. New system properties

Częstotliwość [Hz]	Przeregulowanie	Czas regulacji [s]	Czas narastania [s]
<0,4	1,68	3,84	0,229

## 6. Wnioski

Potwierdzono doświadczalnie, że właściwości dynamiczne człowieka są z góry ograniczone jego parametrami fizycznymi, co bezpośrednio przekłada się na postać jego modelu. Została zaprezentowana procedura pozwalająca na identyfikację parametrów operatora. Procedura ta może być wykorzystana do badania właściwości człowieka dla innych rodzajów wymuszeń oraz do badań wpływu zewnętrznych bodźców, takich jak stres czy zmęczenie.

W pracy został również wskazany zakres częstotliwości, dla których odpowiedź człowieka jest satysfakcjonująca. Dla wyznaczonego zakresu częstotliwości został zaproponowany jeden uśredniony model dynamiki człowieka. Można przyjąć, że do dalszych prac we wskazanym zakresie częstotliwości można korzystać z przedstawionego modelu.

Kolejnym równie ważnym wnioskiem jest fakt, że człowiek potrafi się adaptować do różnego rodzaju wymuszeń. Na podstawie przebiegów dla różnych częstotliwości łatwo zauważyć, że charakterystyki człowieka zmieniają się i adaptują do danego rodzaju wymuszenia.

## Bibliografia

- Masato Abe: *Vehicle handling dynamics*, Elviesier Ltd., 2009, 243–266.
- McRuer D.T., Hofmann L.G., Jex H.R., Moore G.P., Phatak A.V., Weir D.H., Wolkovitch J.: *New Approaches to Human-Pilot vehicle dynamic analysis*. Systems Technology, Incorporated, Hawthorne, California 1968.
- McRuer D.T., Graham D.: *Human Pilot Dynamics in Compensatory system*. AFFDL-TR-65-15, 1965.
- McRuer D.T., *Dynamic Response of Human Operators*. USAF, WADC TR 56–524, 1957.
- Gittleman B., Dwan T.E., Smiley C.S.: *System Identification Human Tracking Response*. IEEE Transactions on education, vol. 35, no. 1, 1992, 31–37.
- Satoshi Suzuki, Katsuhisa Furuta, Fumio Harashima, *Overview of human adaptive mechatronice and assist control to enchance humans proficiency*. KINTEX, 2005.
- Satoshi Suzuki, Keiichi Kurichara, Katsuhia Furata, *Variable dynamic Assist Control on Haptic System for*

*human adaptive mechatronics*. 44<sup>th</sup> IEEE Conference on decision and Control, 2005, 4596–4601.

8. Lian-Kuang Chen, A. Galip Ulsoy, *Identification of a driver steering model and model uncertainty from driving Simulator*, „Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control”, 2001, vol. 123, 623–629. ■

### Human model identification

**Abstract:** The aim of this paper was to identify a human operator as a system in Man-Machine system. A tracking task was used to collect all necessary data. Human operator using a joystick was to track the given signal with different frequencies. A tracking task was written in MATLAB/Simulink, with Real-Time workshop modul. For the purposes of identification the System Identification Toolbox was used. This work presents a range of frequencies within the human can perform. A final product of the experiment is one human model. The final coefficients was obtained from earlier approximation, based on data from experiment. Presented model can be used in further study concerning the experiments of man-machine systems.

**Keywords:** human, identification, system

#### mgr inż. Antoni Kopyt

Absolwent, doktorant wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Pracuje głównie nad badaniami dotyczącymi współdziałania układów człowiek-maszyna.

*e-mail:* akopyt@meil.pw.edu.pl



#### dr inż. Robert Głębocki

Absolwent Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Specjalizuje się w badaniach nad układami sterowania obiektów mobilnych. Szczególnie w zastosowaniach związanych z obronnością i bezpieczeństwem. Główna tematyka prac badawczych i rozwojowych obejmuje platformy naziemne i latające oraz pociski i rakiety sterowane. Kieruje Uczelnianym Centrum Badawczym Obronności i Bezpieczeństwa w Politechnice Warszawskiej.

*e-mail:* rglebocki@meil.pw.edu.pl

