

MODELOWANIE SŁABOŚCI CZYNNIKA KOGNITYWNEGO*

w zarządzaniu zagrożeniami w elektrowniach jądrowych: perspektywa ontologiczna meta-teorii TOGA

(Human Cognitive Vulnerabilities in Nuclear Power Plant Emergency Management: the TOGA Meta-Theory Ontological Perspective)

Adam Maria Gadomski, Marta Weronika Wronikowska

Abstrakt

Celem niniejszej pracy jest rozpoznanie ludzkich i organizacyjnych słabości (*human cognitive vulnerability*) w różnych typach kognitywistycznego podejmowania decyzji występujących w elektrowniach jądrowych (EJ), w szczególności w sytuacjach wysokiego ryzyka. Przyjęty ontologiczny schemat modelowania i analizy tego problemu, korzystając z tzw. modelu funkcjonalnego inteligentnego agenta (IA) bazuje na meta-teorii TOGA (*Top-down Object-based Goal-oriented Approach*), w której podstawowa struktura tzw. inteligentnego agenta oparta jest na wyszczególnieniu oddziaływania między formalnie zdefiniowanymi pojęciami jak: informacja, preferencja i wiedza (*Information, Preferences, Knowledge*, tzw. model, IPK) znajdującymi się w dwóch funkcjonalnych warstwach umysłu człowieka: symbolicznej i subsymbolicznej. W efekcie formalizacji ontologii zagadnienia, otrzymane modele kognitywnego podejmowania indywidualnych i organizacyjnych decyzji, umożliwiają klasyfikowanie i rozpoznawanie miejsc w modelu, gdzie w szczególności, w warunkach wysokiego ryzyka, na różnych etapach kognitywnego podejmowania decyzji (KPD) mogą się pojawiać poważne błędy w percepcji i rozumowaniu nieprzewidziane w procedurach bezpieczeństwa elektrowni jądrowej. Ważność problemu tzw. ludzkiej kognitywnej słabości (LKS) operatorów elektrowni jądrowej zaczyna być stopniowo coraz to bardziej widoczna w literaturze światowej (na przykład publikacje: IAEA i US NRC) dotyczącej norm i analiz bezpieczeństwa.

Wstęp i motywacja

Niniejsza praca dotyczy, ciągle jeszcze relatywnie nowego w środowisku inżynierskim, aspektu interakcji człowiek-technologia i związanego z nim ryzyka wynikającego z obecności w złożonych dużych obiektach przemysłowych czynnika ludzkiego. Czynnikiem ten realizowany jest przez tak zwane ludzkie części systemu (*human components*), które odbierają informacje, interpretują je, a następnie podejmują decyzje (działania) dotyczące eksploatacji i bezpieczeństwa funkcjonowania systemu technologicznego. W języku systemowym, klasyczne projektowanie systemów produkcyjnych, w warunkach wysokiego ryzyka (jak np. reaktorów jądrowych, sieci gazowych, energetycznych i informatycznych czy zakładów chemicznych) ma trzy podstawowe cele [15]:

1. Zapewnienie wysokiej zdolności produkcyjnej (*production goal*).
2. Zapewnienie możliwie wysokiego bezpieczeństwa eksploatacji (*safety goal*).
3. Uzyskanie relatywnie najniższych możliwych kosztów funkcjonowania, które nie prowadziłyby do konfliktu z uprzednio wymienionymi celami produkcji i bezpieczeństwa (*economic goal*).

W przypadku elektrowni jądrowych, główny wysiłek zorientowany na bezpieczeństwo dotyczył do tej pory:

A. Projektowania elektrowni i jej wyposażenia, systemów nadzoru i sterowania ciągle bardziej niezawodnych, odpornych na zagrożenia wewnętrzne i zewnętrzne oraz możliwie automatycznych (wg technologii odpowiednio II, III i IV generacji reaktorów).

* Kognitywny (łac. *cognitio* 'poznanie') związany z procesem poznawczym, odnoszący się do poznawania czegoś „Słownik Wyrazów Obcych” Wyd. Europa, Wrocław, 2001.

B. Przeprowadzenia szkoleń i treningów na odpowiednich symulatorach – gdzie główny cel zadania polega na przystosowaniu i nauczaniu operatorów, menadżerów jak i zespołu pracowników technicznych elektrowni jądrowych właściwych procedur postępowania wymaganych w czasie eksploatacji.

C. Dokonania selekcji personelu i opieki nad nim według odpowiednich kryteriów medycznych i psychologicznych.

Projektowanie nowych ciągle bardziej bezpiecznych rozwiązań konstrukcyjnych, przygotowanie procedur eksploatacyjnych w normalnych i anomalnych warunkach oraz opracowywanie programów szkoleniowych były głównie zadaniem inżynierów o różnych specjalizacjach, natomiast udział specjalistów od *human component* był do niedawna marginalny [16].

Klasyczne podejście do zwiększenia niezawodności (tzw. *Human Reliability Engineering*, HRE) operatorów EJ i ich zespołów bazowało na zwiększaniu niezawodności technologicznej EJ, tzn. jej projektu, procedur eksploatacji oraz tzw. interfejsu operator-komputer, pulpit sterowniczy (konsola w sterowni). Ludzki aspekt sprowadzał się głównie na wyuczeniu operatorów procedur eksploatacji i bezpieczeństwa, tak aby mogli je wykonywać na poziomie półautomatycznym (na przykład: *The methodology applied is generally based on publications such as NUREG/CR-3331, "A Methodology for Allocation of Nuclear Power Plant Control Functions to Human and Automated Control"*).

Obecnie, nowoczesne podejście dąży do systemowego zintegrowanego zwiększenia bezpieczeństwa EJ poprzez łączenie: czynnika technologicznego, kognitywistycznego (czyli ludzkiego, mentalnego), organizacyjnego i środowiskowego.

Trzy kierunki badań dotyczące tzw. czynników ludzkich (*cognitive human factor*) są następujące:

1. Wykorzystanie nowych osiągnięć ergonomii kognitywnej do projektowania pulpitu sterowniczego i schematów na ekranie monitora dotyczących stanu urządzeń w elektrowni łatwiejszych do percepcji i przedstawianych we właściwej kolejności w zależności od zadań operatora.

2. Rozpoznanie i łagodzenie możliwych przejściowych stanów umysłowych – stresów operatorów.

3. Opracowywanie aktywnych i tzw. inteligentnych systemów wsparcia decyzyjnego (IDSS), które uwzględniałyby możliwe stany kognitywne umysłu operatora i innych decydentów w elektrowni.

Właśnie w powyższym kontekście został zdefiniowany czynnik tzw. ludzkiej kognitywnej słabości – LKS (*human cognitive vulnerability factor*) oraz zastosowana została do jego modelowania metodologia TOGA.

Definicje i ontologiczne podstawy modelowania

TOGA (*Top-down Object-based Goal-oriented Approach*) [3], [4], [5], [8] to teoria (lub meta-teoria) uporządkowania wiedzy zaproponowana przez Adama M. Gadomskiego w 1989 r. we Włoskiej Agencji ds. Nowych Technologii, Energii i Środowiska ENEA (*Italian National Agency for New Technologies, Energy, and Sustainable Economic Development*). Głównym celem budowy teorii TOGA było opracowanie strategii i ontologii do metodologii budowania systemów inteligentnego wsparcia decyzyjnego w warunkach zagrożeń dla operatorów reaktorów jądrowych oraz dla identyfikacji możliwości błędu operatora w oparciu o model KPD (model kognitywistycznego podejmowania decyzji tak zwanego użytkownika *user model*). Sukcesywnie, TOGA została uogólniona do funkcjonalnej meta-teorii specyfikacji i badania systemów złożonych [7].

Teoria TOGA składa się z trzech systemów koncepcyjnych: TAO – teoria obiektów abstrakcyjnych (*Theory of Abstract Object*), KNOCS – system koncepcji wiedzy (*Knowledge Conceptualization System*) i MRUS – system reguł metodologicznych (*Methodological Rules System*) zawierający: strategię bazową obiektu (object-based), strategię zorientowaną na cel (*goal-oriented*) oraz strategię przepływów góra-dół (*top-down*).

Należy dodać, że system KNOCS zawiera podstawową komórkę funkcjonalnego rekurencyjnego modelowania zadanej dziedziny abstrakcyjnego inteligentnego agenta (AIA), tzw. architekturę IPK, w której:

Informacje (I) – to dane reprezentujące konkretną własność wybranej dziedziny aktywności agenta.

Preferencje (P) – stanowią uporządkowane relacje pomiędzy dwoma stanami dziedziny aktywności agenta, wskazujące stan o wyższej użyteczności.

Wiedza (K) – każda abstrakcyjna własność inteligentnego agenta posiadająca zdolność przetwarzania/transformowania (ilościowej lub jakościowej) informacji w inną informację, lub nową wiedzę.

Informacja to dane dla wiedzy, a preferencje służą do wybrania konkretnej wiedzy, która te informacje będzie przetwarzać w nową informację. Podstawowy schemat iteracyjny pomiędzy I, P i K jest realizowany przez dwa następujące po sobie kroki [10]:

Informacja nr 1 => Preferencje => wybór: cel => wybór: Wiedza A

Informacja nr 1 => Wiedza A => *Informacja nr 2* => *Działanie*.

Kognitywistyczne podejmowanie decyzji występuje głównie w ontologii psychologii [1], [6] [12], [13].

Na potrzeby niniejszej pracy, w oparciu o meta-ontologiczne założenia metateorii TOGA, została także przyjęta następująca definicja kognitywistycznego podejmowania decyzji (KPD): jako złożony abstrakcyjny proces prowadzący do dokonania wyboru działania, a wzorowany na funkcjonowaniu ludzkiego umysłu, z uwzględnieniem biologicznych ograniczeń organizmu, jak i aktualnych: informacji, preferencji i wiedzy decydenta [17]. KPD możemy opisać przez pojęciowy funkcjonalny model składający się z dwóch warstw: symbolicznej i subsymbolicznej.

W symbolicznej warstwie KPD bazuje na zastosowaniu kryteriów, alternatyw i dostępnej informacji, które to w efekcie powodują podjęcie konkretnej decyzji, a zatem:

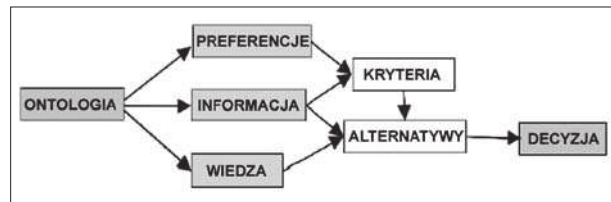
- kryteria – stanowią zbiór reguł służących do dokonania wyboru ze zbioru określonych alternatyw, na przykład: minimalny czas podróży. Kryteria te zależą od preferencji decydenta. Najbardziej powszechne kryteria służą do oceny i wyboru alternatyw, z punktu widzenia ich użyteczności lub ryzyka.
- alternatywy – są to dostępne działania/akcje wynikające z wiedzy użytkownika, których realizacja może prowadzić do założonego uprzednio celu (to znaczy do oczekiwanego stanu jego dziedziny aktywności).

Intuicyjne definicje ontologii w 1993 r. zaproponował Gruber [11]: Ontologia to specyfikacja przyjętego rozwiązania koncepcyjnego (konceptualizacji). Autorzy w powyższym kontekście teorii TOGA, przyjmują, że ontologia (Ω) to zbiór terminów/pojęć opisujących własności wybranej dziedziny z punktu widzenia celów i możliwości operacyjnych (wiedzy) jakiegoś agenta inteligentnego, czyli Ω [G, Ko], gdzie G to zbiór możliwych celów, a Ko to wiedza operacyjna agenta ludzkiego lub sztucznego, na przykład robota.

W większości obszarów aktywności człowieka ontologie powstają przyrostowo w postaci słowników wybranych dziedzin, nie są postrzegane świadomie i w efekcie ulegają przemieszaniu.

Kryteria i alternatywy, budowane są na posiadanej przez decydenta ontologii. Dlatego też, zmiana czy wzbogacenie ontologii agenta umożliwia zastosowanie przez niego nowych metod i modeli oraz specjalizacji działań prowadzących do dokonania wyboru w procesie decyzyjnym, szczególnie w dziedzinach nauk i inżynierii interdyscyplinarnych.

Sytuacja taka ma istotny wpływ na podejmowanie decyzji, a w konsekwencji na bezpieczeństwo EJ, które jest wspierane przez technologie informatyczne wykorzystujące różne programy komputerowe bazujące na różnych ontologiach. W obecnej sytuacji podejmowanie decyzji przez operatora EJ jest przeprowadzane w „języku” jego biblioteki procedur eksploatacyjnych i zasad zachowania bezpieczeństwa.



Rys. 1. Wpływ ontologii na poszczególne funkcjonalne warstwy kognitywistycznego podejmowania decyzji [17]

Rys. 1 przedstawia schematycznie zależność decyzji od arbitralnie przyjętej ontologii.

Baza ontologiczna meta-teorii TOGA umożliwia także wyróżnienie istotnych dla szkolenia operatorów modeli cząstkowych opisujących różne sytuacje dotyczące kognitywistycznego podejmowania decyzji. Przykładowa klasyfikacja sytuacji decyzyjnych przedstawiona w Tabeli 1 daje wstępną bazę do bardziej szczegółowego rozpoznania istotnych typów błędów decyzyjnych spowodowanych przyjęciem niewłaściwych kryteriów czy ograniczeniem rozpatrywanych alternatyw lub na przykład posiadaniem niewystarczających informacji. Należy zauważyć, że S2 nie jest sytuacją decyzyjną, ale realizacją ustalonego algorytmu.

Tabela 1. Możliwe początkowe sytuacje KPD zależne od takich składowych jak: kryteria, alternatywy i informacje [17]

Składowe KPD/ sytuacje	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Kryteria – KR	–	+	+	–	+	–	+	–
Alternatywy – A	–	+	–	+	–	+	+	–
Informacje – I	–	+	–	+	+	–	–	+

„+” oznacza składową wystarczającą, „–” oznacza potrzebę budowy lub pobrania określonej składowej do podjęcia finalnej decyzji.

Najbardziej złożona i do tej pory nie wystarczająco modelowana jest subsymboliczna warstwa KPD. Polega ona na nieświadomych mechanizmach powstawania asocjacji, wyboru podobieństwa i występujących emocji. Takie procesy są szybsze i albo prowadzą od razu do decyzji lub meta-decyzji typu uniknięcie oczekiwanej decyzji, albo do modyfikacji symbolicznych i świadomych preferencji inteligentnego agenta (IA). Subsymboliczne podejmowanie decyzji jest zwykle wynikiem długich treningów i staje się szczególnie ważne w sytuacjach przewidywanego ryzyka, wtedy, kiedy istotnym staje się szybkość i precyzja, np. u pilotów samolotów, czy operatorów zarządzających stanami wyjątkowymi.

Ludzka kognitywna słabość

Ludzka kognitywna słabość (LKS) to taka własność organizacji ludzkiej lub jednostki (nazywanej agentem inteligentnym, IA), która zwykle nie zakłóca realizacji jej rutynowych celów, jak i funkcjonowania w warunkach znanych i przewidywalnych zagrożeń. Natomiast, w sytuacjach nieprzewidywanych

i wymagających podejmowania decyzji w warunkach wysokiego ryzyka, LKS może prowadzić do podjęcia błędnych decyzji przez IA [9].

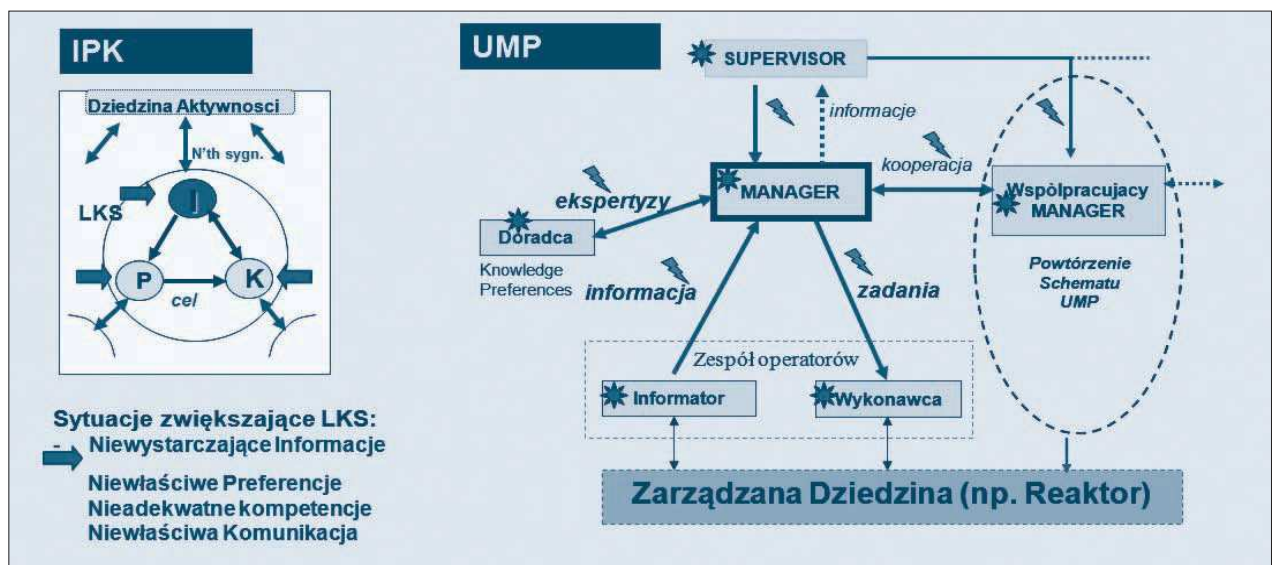
W ramach meta-teorii TOGA, podejmowanie decyzji złożonych przez jednego lub zespół decydentów jest opisywalne poprzez funkcjonalny model zarządzania, tak zwany Uniwersalny Paradygmat Zarządzania (UMP [4]). W modelu tym są wyróżnione funkcje kognitywne, które wspomagają decyzje managerskie IA. W zależności od komplikacji i zakresu zadań, funkcje te mogą być albo realizowane przez jedną osobę, albo rozdzielone w jakiejś strukturze organizacyjnej między autonomiczne jednostki decyzyjno-wykonawcze, takie jak: superwizor, doradca, informator, wykonawca i współpracujący menadżer (zob. rys. 2). Ich poprawne funkcjonowanie zależy od posiadanych przez nich profesjonal-

nych IPK (informacje, preferencje, wiedza) adekwatnych do ich ról w organizacji.

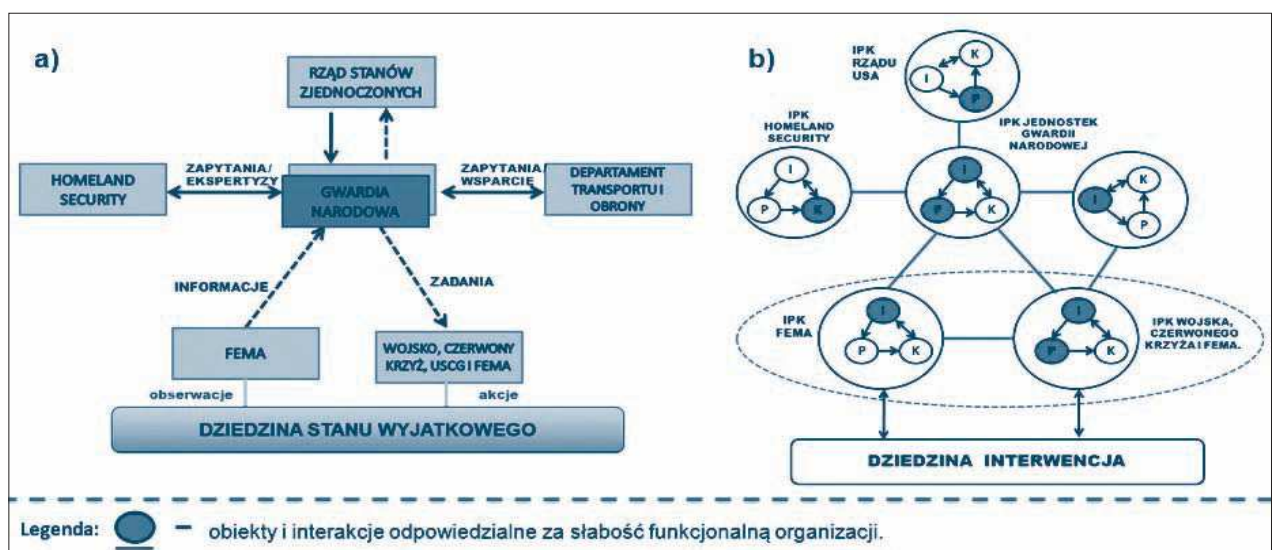
Rys. 2 przedstawia także miejsca podatne na lokalizację czynnika LKS, a także takie sytuacje zwiększające LKS, jak niewystarczające informacje, niewłaściwe preferencje, nieadekwatne kompetencje, czy niewłaściwa komunikacja.

Wprowadzona przez nas ontologia TOGA i uproszczony model KPD umożliwi także wyróżnienie trzech poziomów słabości LKS oraz zidentyfikowanie ich własności jako potencjalnych przyczyn odpowiedzialnych za wystąpienie LKS [10].

Pierwszy poziom słabości LKS, dotyczy niepewnych, niewystarczających lub niedostępnych informacji (I), preferencji (P) lub wiedzy (K). Służą one do generacji kryteriów (z preferencji) i alternatyw (z wiedzy).



Rys. 2. Model IPK i Uniwersalny Paradygmat Zarządzania (Universal Management Paradigm – UMP) z ilustracją miejsc potencjalnych wystąpień LKS [4]



Rys. 3. Przykład zastosowania UMP i IPK do identyfikacji słabości kognitywnej krajowych organizacji na przykładzie głównych decydentów walczących z huraganem Katrina w Stanach Zjednoczonych: a) interakcje między głównymi organizacjami rządowymi zaangażowanymi w tym zdarzeniu, b) identyfikacja kompetencji i jakości współpracy między tymi organizacjami (na podstawie [16])

Drugi poziom słabości zależy od sytuacji początkowej KPD, oznaczonej w Tabeli 1. Przez Si, gdzie „+” oznacza „wystarczającą”, a „-” oznacza „niewystarczającą” informację (I) kryteria (Kr) lub alternatywy (A).

Trzeci poziom słabości może występować w zespole ludzkim, związany jest z rolą zarządzania i może dotyczyć indywidualnych osób lub organizacji ludzkich. Wyróżnione *blyskawicami* na rys. 2 relacje i obiekty ludzkie (indywidua lub ich organizacje) wskazują nam potencjalne miejsca wystąpienia czynnika LKS.

Rezultaty i zastosowanie

Przedstawione studium teoretyczne jest tylko informacją o wynikach wieloletnich prac przeprowadzonych w ENEA ukierunkowanych na zarządzaniu stanów wyjątkowych w systemach wysokiego ryzyka typu człowiek-technologia. Studia aplikacyjne prowadzono we współpracy z Międzyuniwersyteckim Centrum ECONA i z Wydziałem Psychologii Uniwersytetu Rzymskiego La Sapienza. Niniejszy artykuł jest ilustracją zastosowania strukturalnego i systemowego podejścia do identyfikacji złożonych obiektów kognitywnych (OK) bazujących na meta-teorii TOGA. Otrzymane modele wskazują na te atrybuty OK, które można uważać za kluczowe dla bezpiecznej pracy zespołu EJ oraz które są równocześnie narażone na związane z nimi wystąpienia czynnika LKS [2]. Dalsze prace badawcze będą dotyczyć:

a) bardziej szczegółowej identyfikacji przyczyn występowania LKS,

b) metod zorientowanych na wczesne rozpoznanie LKS i zapobieganie ich konsekwencjom.

Równocześnie otrzymane wyniki powinny także dostarczyć materiału do projektowania zaawansowanych, aktywnych systemów wsparcia decyzyjnego (*Intelligent Decision Support System Networks*) [5], [6] dla personelu strategiczno-operacyjnego elektrowni jądrowej.

Podziękowania

Dziękujemy doktorowi Andrzejowi Mikulskiemu za jego cenną pomoc, motywację i cierpliwość.

Literatura

- [1] Anderson J.J., Cognitive aspects of decision making, Workshop, Washington DC Crystal City Hiltonn 2008.
- [2] Cappelli M., Gadomski A.M., Sepielli M., Human Factors in Nuclear Power Plant Safety Management: A Socio-Cognitive Modeling Approach using TOGA Meta-Theory. In the Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2011: Nice (FR), May 2nd – 5nd, 2011.
- [3] Gadomski A.M., 1994, TOGA: A methodological and Conceptual Pattern for modeling of Abstract Intelligent Agent. In *Proc. of the 'First International Round-Table on Abstract Intelligent Agent'*, 25-27 Jan. 1993, ENEA print.
- [4] Gadomski A.M., Personoids Organizations: An Approach to Highly Autonomous Software Architectures „11th International Conference on Mathematical and

- Computer Modeling and Scientific Computing: Concurrent Engineering Based on Agent-Oriented and Knowledge-Oriented Approaches*, March 31, 1997, Georgetown University Conference Center, Washington.
- [5] Gadomski A.M., Bologna S., DiCostanzo G., Perini A., Schaerf M., Towards Intelligent Decision Support Systems for Emergency Managers: The IDA Approach. *International Journal of Risk Assessment and Management*, IJRAM, Vol. 2, No 1, 2001.
- [6] Gadomski A.M., Bologna S., Di Costanzo G., Perini A. and Schaerf M. 'Towards intelligent decision support systems for emergency managers: the IDA approach', *International Journal of Risk Assessment and Management*, 2001, Vol. 2, Nos. 3/4.
- [7] Gadomski A.M., Global Design IPK framework and Intelligent Cognitive Advisor, EUREKA / ITEA Complex Systems Engineering, 1st SOPHOCLES European Workshop, Marseille, France, Sept. 24, 2002. Also: TOGA Systemic Approach to the Global Specification – Sophocles Project Report, 2002.
- [8] Gadomski A.M., 2002. TOGA Systemic Approach to the Global Specification. Sophocles Project Report, EU EUREKA., March 15, 2008.
- [9] Gadomski A.M., 2007. Modeling of Human Organization Vulnerability: TOGA Meta-Theory Approach to the Socio-Cognitive Complexity. In *Proc. of ECCS 2007*, European Conference.
- [10] Gadomski A.M., Human organisation socio-cognitive vulnerability: the TOGA meta-theory approach to the modelling methodology.. *International Journal of Critical Infrastructures (IJCI)*. Vol. 5 – Issue 1/2 – 2009.
- [11] Gruber T.R., A translation approach to portable ontologies. *Knowledge Acquisition*, 5(2):199-220, 1993.
- [12] Mintz A., Integrating cognitive and rational theories of foreign policy decision making, s.165, 2003.
- [13] Ogiela R., Cognitive Techniques in Visual Data Interpretation, Springer, 2009, s. 65-70.
- [14] Pestilli F., Gadomski A.M., Olivetti-Belardinelli M., Route spatial representation of decisional problems: Application of TOGA framework to the modeling of cognitive agent. International Conference on Spatial Cognition: Scientific Research and Applications, Rome, Italy. December 2000. *International Quarterly of Cognitive Science* 1: 27, Pabst Edit., 2000.
- [15] Rasmussen J., Risk Management in a Dynamic Society: A Modelling Problem. *Safety Science*, 27(2/3), 1997.
- [16] Sargeni P., L'ergonomia cognitiva nella vulnerabilità delle organizzazioni: la prospettiva socio-cognitiva di TOGA, Università „La Sapienza” di Roma, Facoltà di Scienze della Comunicazione, Cattedra di Interazione Uomo-Macchina, 2006.
- [17] Swaton E., Human factors in the operation of nuclear power plants – IAEA, in the meeting in Roskilde in May 1987 on „The human factor information feedback in nuclear power: www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/.
- [18] Wronikowska M.W., Coping with the complexity of cognitive decision-making: the TOGA meta-theory approach, European Conference on Complex Systems (ECCS) 2012. Springer Proceedings in Complexity, 2013.

Adam Maria Gadomski,

Rada Naukowa ECONA

(Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Elaborazione Cognitiva in Sistemi Naturali e Artificiali), Roma

Marta Weronika Wronikowska,

Università degli Studi di Roma „La Sapienza”,

Facoltà Medicina e Psicologia, Via dei Marsi 47, Roma