

# Autoreferat

**Dr Bożena Woźna-Szcześniak**  
Instytut Matematyki i Informatyki  
Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie

## Załącznik 2

### 1 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- *Doktor nauk matematycznych w zakresie informatyki* (rozprawa wyróżniona), Instytut Podstaw Informatyki, Polska Akademia Nauk, Warszawa, 24 czerwiec 2003. Tytuł rozprawy: "Ograniczona weryfikacja modelowa dla logik czasu rozgałęzionego. Szybka metoda falsyfikacji".
- *Magister matematyki (specjalność nauczycielska w zakresie matematyki i informatyki)*, Wydział Matematyki, Fizyki i Chemii, Uniwersytet Opolski, Opole, 17 kwiecień 1997. Tytuł pracy dyplomowej: "Obsługa plotera w języku C/C++".

### 2 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 1.10.2003-nadal: Instytut Matematyki i Informatyki, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie. Stanowisko: adiunkt.
  - 1.02.2004-30.06.2006: urlop bezpłatny w Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie.
  - 1.02.2004-31.10.2004: Wydział Informatyki, King's College, Londyn, Wielka Brytania. Stanowisko: postdoc (asystent badawczy).
  - 1.11.2004-30.06.2006: Wydział Informatyki, University College London, Londyn, Wielka Brytania. Stanowisko: postdoc (asystent badawczy).
- 1.10.1997-30.09.2003: Instytut Matematyki i Informatyki, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie. Stanowisko: asystent.

### 3 Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

#### 3.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Modelowanie i weryfikacja modelowa systemów wieloagentowych oraz systemów z czasem.

#### 3.2 Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa

1. **Bożena Woźna**. *ACTL\* properties and bounded model checking*. Fundamenta Informaticae 63(1), str. 65-87, 2004.  
Impact Factor: 0.785.  
Udział procentowy habilitantki: 100%.
2. Alessio Lomuscio, Wojciech Penczek, **Bożena Woźna**. *Bounded model checking for deontic interpreted systems*. Materiały 2. międzynarodowych warsztatów: Logic and Communication in Multi-Agent Systems (LCMAS 2004). Electronic Notes in Theoretical Computer Science,

- Elsevier, tom 126, str. 93-114, 2005.  
 Impact Factor: brak.  
 Udział procentowy habilitantki: 55%.
3. Alessio Lomuscio, **Bożena Woźna**. *A Logic for knowledge, correctness, and real time*. Materiały pokonferencyjne 5. międzynarodowych warsztatów: Computational Logic in Multi-Agent Systems (CLIMA 2004). Lecture Notes in Artificial Intelligence, tom 3487, str. 1-15, Springer-Verlag, 2005.  
 Impact Factor: 0.302.  
 Udział procentowy habilitantki: 70%.
  4. Alessio Lomuscio, **Bożena Woźna**. *A complete and decidable axiomatisation for deontic interpreted systems*. Materiały 8. międzynarodowych warsztatów: Deontic Logic in Computer Science (DEON 2006), Lecture Notes in Artificial Intelligence, tom 4048, str. 238-254, Springer-Verlag, 2006.  
 Impact Factor: brak.  
 Udział procentowy habilitantki: 70%.
  5. Alessio Lomuscio, **Bożena Woźna**. *A combination of explicit and deductive knowledge with branching time: completeness and decidability results*. Wybrane materiały 3. międzynarodowych warsztatów: Declarative Agent Languages and Technologies (DALT 2005). Lecture Notes in Artificial Intelligence, tom 3904, str. 188-204, Springer-Verlag, 2006.  
 Impact Factor: brak.  
 Udział procentowy habilitantki: 70%.
  6. Alessio Lomuscio, **Bożena Woźna**. *A complete and decidable security-specialised logic and its application to the TESLA protocol*. Materiały 5. międzynarodowej konferencji: Autonomus Agents and Multi Agent Systems (AAMAS 2006). ACM Press, str. 145-152, 2006.  
 Praca nominowana do nagrody na najlepszą pracę konferencji AAMAS 2006.  
 Impact Factor: brak.  
 Udział procentowy habilitantki: 70%.
  7. Alessio Lomuscio, Wojciech Penczek, **Bożena Woźna**. *Bounded model checking for knowledge and real time*. Artificial Intelligence 171, str. 1011-1038, Elsevier, 2007.  
 Impact Factor: 3.008.  
 Udział procentowy habilitantki: 55%.
  8. **Bożena Woźna**, Andrzej Zbrzezny. *Bounded model checking for the existential fragment of TCTL<sub>G</sub> and diagonal timed automata*. Fundamenta Informaticae 79(1-2), str. 229-256, 2007.  
 Impact Factor: 0.693.  
 Udział procentowy habilitantki: 50%.
  9. Alessio Lomuscio, Franco Raimondi, **Bożena Woźna**. *Verification of the TESLA protocol in MCMAS-X*. Fundamenta Informaticae 79(3-4), str. 473-486, 2007.  
 Impact Factor: 0.693.  
 Udział procentowy habilitantki: 55%.
  10. **Bożena Woźna-Szcześniak**. *Bounded model checking for the existential part of Real-Time CTL and knowledge*. Materiały pokonferencyjne międzynarodowej konferencji: Advances in Software Engineering Techniques (CEE-SET 2009). Lecture Notes in Computer Science, tom 7054, str. 164-178, Springer-Verlag, 2012.  
 Impact Factor: brak.  
 Udział procentowy habilitantki: 100%.
  11. **Bożena Woźna-Szcześniak**, Agnieszka Zbrzezny, Andrzej Zbrzezny. *The BMC method for the existential part of RTCTLK and interleaved interpreted systems*. Materiały 15. portugalskiej międzynarodowej konferencji: Artificial Intelligence (EPIA 2011). Lecture Notes in Artificial Intelligence, tom 7026, str. 551-565, Springer-Verlag, 2011.  
 Impact Factor: brak.  
 Udział procentowy habilitantki: 45%.
  12. Wojciech Penczek, **Bożena Woźna-Szcześniak**, Andrzej Zbrzezny. *Towards SAT-based BMC for LTLK over interleaved interpreted systems*. Fundamenta Informaticae 119(3-4), str. 373-392, 2012.  
 Impact Factor: 0.365.

Udział procentowy habilitantki: 45%.

13. **Bożena Woźna-Szcześniak**, Andrzej Zbrzezny. *A translation of the existential model checking problem from MITL to HLTL*. *Fundamenta Informaticae* 122(4), str. 401-420, 2013.

Impact Factor: 0.365.

Udział procentowy habilitantki: 50%.

### 3.3 Omówienie celu naukowego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

System czasu rzeczywistego (ang. a real-time system - RTS) to system, w którym poprawność obliczeń zależy nie tylko od jego poprawności logicznej, ale również od czasu, w którym uzyskiwany jest wynik jego działania. Formalizmy uwzględniające czas są z powodzeniem stosowane w systemach krytycznych dla życia i bezpieczeństwa, systemach planowania, protokołach komunikacyjnych, itp.

Agenci to racjonalne i inteligentne jednostki działające w sposób autonomiczny (posiadając różne informacje i/lub rozbieżne cele) w imieniu swoich użytkowników, wśród otwartych i rozproszonych środowisk, aby rozwiązywać rosnącą liczbę złożonych problemów informatycznych. System wieloagentowy (ang. a multi-agent system - MAS) [74, 68, 71] jest grupą dowolnie połączonych agentów, którzy współdziałają (tzn. komunikują się, koordynują prace, prowadzą pertraktacje, współpracują, itp.), aby rozwiązywać problemy będące poza indywidualnym zasięgiem albo wiedzą pojedynczego agenta.

Współbieżność jest własnością systemów, która pozwala na wykonanie wielu obliczeń równoległych i jest powszechna w dzisiejszej informatyce, na przykład, jest głównym elementem systemów operacyjnych. Współbieżność jest niestety podatna na błędy typu hazard, czy też brak wzajemnego wykluczenia. Są to problemy, które nie występują w obliczeniach sekwencyjnych, a dodatkowo tradycyjne metody sprawdzania niezawodności, takie jak symulacja i testowanie, zawodzą niestety w systemach współbieżnych ze względu na trudności w powielaniu błędnych zachowań.

Weryfikacja modelowa [22] jest najważniejszą klasą metod automatycznej weryfikacji, której celem jest formalne wykazanie, że określone własności są spełnione przez dany system (np. program współbieżny, protokół komunikacyjny), lub ujawnienie istnienia błędów tego systemu w powtarzalny sposób, tzn. wskazanie kontrprzykładu pokazującego źródło problemu. Główna idea weryfikacji modelowej polega na przedstawieniu (lub zakodowaniu) zadanego systemu jako systemu tranzycyjnego, którego stany (osiągalne) stanowią badany model, przedstawieniu (zakodowaniu) specyfikacji jako formuły logicznej i algorytmicznym (automatycznym) sprawdzeniu, czy formuła jest prawdziwa w modelu.

Weryfikacja modelowa systemów czasowych [1, 2, 32, 3] oraz systemów wieloagentowych [35, 41] jest bardzo aktywnym obszarem badań naukowych zarówno tych teoretycznych jak i praktycznych. Jednakże jej praktyczne zastosowanie jest mocno ograniczane przez problem eksplozji stanów, który oznacza, że liczba stanów w modelu rośnie wykładniczo względem rozmiaru reprezentowanego systemu. Aby uniknąć tego problemu, wiele różnych technik redukujących przestrzeń stanów oraz symboliczna weryfikacja modelowa zostało opracowanych. Do technik redukujących przestrzeń stanów zaliczyć można, m. in., redukcje częściowo-porzadkowe [61, 60, 64, 69, 73, 5, 57, 50], metodę symetrii [31, 33, 17, 34, 42, 26, 43], oraz metody abstrakcji [29, 27, 21, 38], w tym metodę CEGAR (ang. counterexample guided abstraction refinement) [18, 19, 23, 24, 16, 20, 15, 46, 40, 72, 48]. Do technik symbolicznej weryfikacji modelowej, której głównym założeniem jest reprezentowanie przeszukiwanej przestrzeni stanów w sposób symboliczny (poprzez formuły logiczne), zalicza się metody bazujące na Boole'owskich diagramach decyzyjnych (BDD) [55, 11, 12, 13, 66], w tym ograniczoną weryfikację modelową [28, 14, 44], lub na translacji tego problemu testowania spełnialności formuły zdaniowej (problemu SAT), w tym ograniczoną [7, 6, 8, 39, 65, 62, 4] i nieograniczoną [56, 45] weryfikację modelową.

Moją pracę habilitacyjną stanowi cykl 13 jednotematycznych publikacji dotyczących modelowania (prace 3 - 6) i weryfikacji modelowej (prace 1, 2, 7 - 13) systemów wieloagentowych oraz systemów czasu rzeczywistego, ze szczególnym uwzględnieniem metody ograniczonej weryfikacji modelowej. Proponowane artykuły zostały opublikowane albo w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (*Fundamenta Informaticae*, *Artificial Intelligence*), albo na renomowanych międzynarodowych konferencjach (AAMAS, CEE-SET, EPIA) i warsztatach (LCMAS, CLIMA, DEON, DALI).

Poniżej przedstawię główne oryginalne rezultaty badań zawarte w cyklu wyżej wymienionych publikacji. Udziały procentowe i mój wkład został wypunktowany w Załączniku 3 do wniosku (tj., *Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dy-*

daktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki), część IB: Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy.

W artykule 1 zaproponowałam, zdefiniowałam i udowodniłam poprawność metody ograniczonej weryfikacji modelowej (OWM, ang. Bounded Model Checking) dla systemów współbieżnych i własności wyrażalnych w egzystencjalnym fragmencie CTL\* (ECTL\*). Oryginalność pracy polega na rozszerzeniu metody OWM zdefiniowanej dla systemów współbieżnych i własności wyrażalnych w egzystencjalnym fragmencie CTL (ECTL) [65] na klasę własności wyrażalnych w ECTL\*. Należy zauważyć, że opracowana metoda została później zastosowana, między innymi, do weryfikacji systemów czasowych modelowanych przez dyskretne automaty czasowe (tj. automaty czasowe, w których dziedziną wartości zegarów jest zbiór liczb naturalnych) [76] oraz do weryfikacji modelu nawigacji serwisów internetowych [37]. Ponadto zaproponowana semantyka ograniczona stała się inspiracją dla A. Zbrzeźnego [80] do opracowania nowego, bardziej efektywnego, kodowania formuł ECTL\* przy pomocy formuł Boole'owskich.

W artykule 2 zaproponowałam, zdefiniowałam i udowodniłam poprawność metody OWM dla systemów wieloagentowych modelowanych przez deontyczne systemy interpretowane oraz własności wyrażalnych w egzystencjalnym fragmencie CTL rozszerzonym o operatory epistemiczne (wiedzowe) i deontyczne (ECTLKD). Oryginalność pracy polega na rozszerzeniu metody OWM zdefiniowanej dla systemów interpretowanych [36] i egzystencjalnego fragmentu CTL rozszerzonego o operatory epistemiczne (ECTLK) [63], na deontyczne systemy interpretowane [51, 52, 53] i własności wyrażalne w języku ECTLKD. Pragnę podkreślić, że w odróżnieniu od standardowego rozumienia i zastosowania operatorów deontycznych jako tych służących do opisywania (modelowania) nakazów, zakazów i dozwolenia, w rozważanym języku ECTLKD przez operatory deontyczne, przyjmując interpretację zaproponowaną w [51, 52, 53], rozumiem operatory modalne reprezentujące poprawne/niepoprawne (odpowiednie/nieodpowiednie) zachowanie się agentów.

W artykule 3 zaproponowałam i zdefiniowałam syntaktykę oraz semantykę nowego języka formalnego, zwanego TCTLKD, do modelowania własności systemów wieloagentowych, których działanie zależy nie tylko od postawionych celów, ale również od czasu (rzeczywistego) w jakim te cele powinny być osiągnięte. Język TCTLKD jest rozszerzeniem logiki temporalnej TCTL (ang. Time Computation Tree Logic) o operatory wiedzowe typu S5 oraz operatory deontyczne z interpretacją zaproponowaną w [51, 52, 53]. Semantyka TCTLKD jest definiowana względem czasowego rozszerzenia deontycznych systemów interpretowanych (ang. *real time deontic interpreted systems*, RTDIS). Oryginalność pracy polega nie tylko na zaproponowaniu nowego języka do specyfikowania własności systemów wieloagentowych, ale również na zaproponowaniu nowego formalnego modelu dla agenta, a mianowicie system wieloagentowy modelowany jest przez sieć komunikujących się automatów czasowych. Artykuł ten, m.in., stał się inspiracją do dalszych badań nad matematycznymi własnościami kombinacji logik temporalnych czasu rzeczywistego i wiedzowego oraz do badania problemu rozstrzygalności weryfikacji modelowej dla tych kombinacji [30].

W artykule 4 przedstawiłam rozwiązanie problemu otwartego postawionego w artykule drugiego współautora [52]. Precyzyjniej, zdefiniowałam adekwatny i pełny system aksjomatyczny dla deontycznych systemów interpretowanych i języka zawierającego pełny CTL, zbiór modalności pozwalających opisać wiedzę agentów (operator *agent i wie/zna*:  $K_i$ ) oraz zbiór modalności pozwalających opisać poprawne/niepoprawne (odpowiednie/nieodpowiednie) zachowanie się agentów (formuła  $O_i\alpha$  reprezentuje fakt, że we wszystkich stanach lokalnych agenta  $i$ , które uznaje się za poprawne zachodzi  $\alpha$ ; formuła  $\widehat{K}_i^j\alpha$  reprezentuje fakt, że agent  $i$  zna  $\alpha$  pod warunkiem, że agent  $j$  działa zgodnie z założeniami systemu). Pragnę zauważyć, że przedstawiony w [52] adekwatny i pełny system aksjomatyczny dla deontycznych systemów interpretowanych był ograniczony do klasycznego rachunku zdań rozszerzonego jedynie o operator wiedzowy  $K_i$  i operator deontyczny  $O_i$ . Podwójnie indeksowany operator  $\widehat{K}_i^j$ , którego znaczenie dla formalnej weryfikacji systemów wieloagentowych jest już uznane, nie był zawarty w tym języku. Artykuł 4, m.in., stał się inspiracją do dalszych badań Alexandra Bolotova, który to wykorzystał wyniki zawarte w artykule 4 do opracowania swojego systemu dowodzenia twierdzeń służącego do modelowania zachowania dynamicznych systemów normatywnych ze szczególnym uwzględnieniem technologii przetwarzania sieciowego (potocznie: technologii gridowej) [9].

W artykule 5 zaproponowałam i zdefiniowałam wielomodalną logikę temporalną o roboczej nazwie *temporalna logika dedukcyjna* (ang. *temporal deductive logic* – TDL). Intuicyjnie rzecz ujmując, język

TDL zawiera pełny CTL, zbiór modalności pozwalających opisać wiedzę typu *implicite* agentów (zbiór operatorów wiedzy typu  $S5$  dla każdego agenta, czyli modalności reprezentujących wszechwiedzących agentów), zbiór modalności pozwalających opisać świadomość agenta (zbiór operatorów, których interpretacja daje faktyczną możliwość sprawdzenia przez agenta, czy dany fakt jest dla niego znany lub też czy jest on dostępny w jego lokalnej bazie danych) oraz zbiór modalności pozwalających opisać wiedzę typu *explicite* agentów (wiedza typu *explicite* to wiedza typu *implicite*, której agent jest świadomy). Oryginalność tej pracy polega nie tylko na zaproponowaniu nowego logicznego formalizmu do modelowania własności systemów wieloagentowych, ale również wykazaniu pewnych metalogicznych własności tego formalizmu. Dokładniej, wykazałam, że język TDL posiada własność skończonego modelu, że problem spełnialności dla tego języka jest rozstrzygalny, oraz zaproponowałam i zdefiniowałam adekwatny i pełny system aksjomatyczny dla TDL. Ponadto pokazałam, że wyrażalność języka TDL pozwala na reprezentowanie niestandardowej wiedzy agenta, zwanej wiedzą dedukcyjną (ang. *deductive knowledge*). Należy zauważyć, że praca jest cytowana w kontekście badań nad formalizmami do specyfikacji protokołów kryptograficznych [25] oraz w kontekście rozwijania algorytmów weryfikacji modelowej dla systemów wieloagentowych reprezentujących, przykładowo, elektroniczny system głosowań [10].

Artykuł 6 to praca nominowana do nagrody za najlepszą pracę prezentowaną na prestiżowej konferencji AAMAS 2006. Można powiedzieć, że artykuł ten jest praktycznym zastosowaniem formalizmu TDL z artykułu 5 do weryfikacji, modelowania i specyfikacji własności protokołów kryptograficznych. Wyspecjalizowany TDL jest wyposażony w intuicyjną i możliwą do zakodowania semantykę, model Dolev-Yao dla intruza oraz adekwatny i pełny system aksjomatyczny. Ponadto umożliwia specyfikację zarówno temporalnych jak i wiedzy aspektów protokołów kryptograficznych. Formalizację modelu Dolev-Yao dla intruza wykonałam poprzez zdefiniowanie funkcji świadomości dla intruza oraz wprowadzenie ustalonej interpretacji dla specjalizowanej kryptograficznej zmiennej zdaniowej. Oryginalność tej pracy polega nie tylko na uszczegółowieniu formalizmu TDL do pracy z protokołami kryptograficznymi, ale również na formalizacji modelu wykonania protokołu TESLA (Time Efficient Stream Loss-tolerant Authentication) w terminach systemu interpretowanego wzbogaconego o zbiór funkcji świadomości, po jednej dla każdego agenta, oraz wyspecyfikowaniu kluczowych własności tego protokołu i ich wyrażeniu w języku TDL. Należy zauważyć, że praca jest cytowana zarówno w kontekście systemów wieloagentowych i automatycznej weryfikacji protokołów kryptograficznych [58, 49], jak i również w kontekście weryfikacji systemów czasu rzeczywistego, na przykład modelowanych przez czasowe sieci Petriego [67].

W artykule 7 wykazałam, że problem weryfikacji modelowej dla egzystencjalnego fragmentu czasowego CTL wzbogaconego o operatory epistemiczne (TECTLK) jest rozstrzygalny. Ponadto zaproponowałam i zdefiniowałam metodę ograniczonej weryfikacji modelowej dla bezprzekątniowych automatów czasowych (ang. *non-diagonal timed automata*) oraz własności wyrażalnych w TECTLK. Zaproponowana ograniczona weryfikacja modelowa wykorzystuje translację problemu weryfikacji modelowej dla TECTLK do problemu weryfikacji modelowej dla  $ECTLK_y$  (egzystencjalnego fragmentu CTL rozszerzonego o operatory epistemiczne, w którym egzystencjalny kwantyfikator ścieżkowy  $E$  – dla pewnego obliczenia/wykonania – został zastąpiony przez indeksowany egzystencjalny kwantyfikator ścieżkowy  $E_y$  - dla pewnego obliczenia/wykonania, które rozpoczęło się od wyzerowania pewnej zmiennej zegarowej). Oryginalność tej pracy polega na:

- zaproponowaniu i zdefiniowaniu *czasowych systemów interpretowanych* (ang. *real-time interpreted systems* - RTISs), epistemicznego grafu regionów jako modelu dla RTISs oraz zdyskretyzowanego systemu interpretowanego,
- udowodnieniu, że prawdziwość danej formuły TECTLK w czasowym systemie interpretowanym jest równoważna prawdziwości odpowiedniej formuły  $ECTLK_y$  w zdyskretyzowanym systemie interpretowanym,
- zdefiniowaniu metody ograniczonej weryfikacji modelowej dla  $ECTLK_y$ .

Należy zauważyć, że praca jest cytowana w kontekście weryfikacji modelowej systemów wieloagentowych [78].

W artykule 8 wraz z dr Andrzejem Zbrzezny zaproponowałam, zdefiniowałam i udowodniłam metodę OWM dla przekątniowych automatów czasowych (ang. *diagonal timed automata*) oraz własności wyrażalnych w egzystencjalnym fragmencie czasowego CTL niezawierającego operatora *Globally* -  $G$  ( $TECTLG$ ). Proponowana metoda rozszerza metodę OWM dla bezprzekątniowych automatów

czasowych (ang. *non-diagonal timed automata*) [75] do pracy z przekątniowymi automatami czasowymi. Rozszerzenie klasy modeli automatów czasowych skutkuje jednak ograniczeniem klasy testowanych własności z tych wyrażalnych w TECTL (egzystencjalny fragment czasowego CTL) do TECTL<sub>G</sub>. Oryginalność tej pracy polega nie tylko na rozszerzeniu metody OWM do pracy z przekątniowymi automatami czasowymi, ale również na zaproponowaniu modelu (nieskończonego grafu regionów) dla przekątniowych automatów czasowych, który zachowuje własności wyrażalne w TCTL<sub>G</sub> (fragment czasowego CTL niezawierający operatora *G*) i daje się symbolicznie zakodować przy pomocy formuł Boole'owskich. Ponadto w pracy został zaproponowany wzbogacony nieskończony graf regionów (ang. *forward projection graph*) dla przekątniowego automatu czasowego, który zachowuje fragment TECTL<sub>G</sub>, w którym nie pozwala się na zagnieżdżenie operatorów temporalnych. Dzięki wzbogaconemu nieskończonemu grafowi regionów znacznie efektywniej można testować metodą ograniczonej weryfikacji modelowej własności, których prawdziwość w modelu zależy od wielokrotnie po sobie następujących przejść czasowych. Należy zauważyć, że praca jest cytowana w kontekście weryfikacji systemów czasu rzeczywistego modelowanych przez automaty czasowe [70, 47].

W artykule 9 zaproponowałam rozszerzenie funkcjonalności narzędzia MCMAS (Model Checker for Multi-Agent Systems), które zostało zaprojektowane i zaimplementowane przez dr Franco Raimondi, o możliwość testowania wiedzy typu *explicite* oraz wiedzy dedukcyjnej, czyli formalizmu TDL zaproponowanego w [54]. Wykazałam, że formalizm TDL można zastosować do automatycznej weryfikacji poprawności protokołów kryptograficznych, a w szczególności protokołu TESLA. Wymagało to opracowania kodowania BDD zarówno dla wyspecjalizowanych kryptograficznych zmiennych zdaniowych należących do języka TDL, jak i dla operatorów reprezentujących wiedzę typu *explicite* i świadomość agentów, a dodatkowo wymagało zakodowania protokołu TESLA oraz jego własności w języku ISPL. Należy zauważyć, że praca jest cytowana w kontekście formalnej weryfikacji systemów czasu rzeczywistego [59].

W artykule 10 zaproponowałam, zdefiniowałam i udowodniłam metodę OWM dla systemów wieloagentowych (w których agenci aby osiągnąć swój cel, muszą spełnić określone warunki czasowe) modelowanych przez systemy interpretowane oraz własności wyrażalnych w egzystencjalnym fragmencie RTCTL rozszerzonym o operatory epistemiczne (RTECTLK). Należy tutaj zauważyć, że język RTECTLK interpretowany w klasycznym systemie interpretowanym (modelu Kripke'go, w którym każda tranzycja wykonywana jest w ciągu jednej jednostki czasowej) ma taką samą wyrażalność jak język ECTLK. Jednakże, długość formuły ECTLK równoważnej danej formule RTECTLK jest wykładniczo dłuższa ze względu na oryginalną formułę RTECTLK. W pracy tej pokazałam również zasadę działania zaproponowanej metody OWM na przykładzie systemu przejazdu kolejowego, zamodelowanego w formalizmie systemów interpretowanych.

W artykule 11 wraz z dr Andrzejem Zbrzezny udoskonaliłam metodę OWM zdefiniowaną w [77] (tj. w artykule 10). W szczególności uprościłam semantykę ograniczoną, co przełożyło się na efektywniejszą translację do SAT i wykazałam jej równoważność z semantyką nieograniczoną. W nowo zaproponowanej translacji do SAT wykorzystałam i przystosowałam do języka RTECTLK rozwiązania zaproponowane w [79] oraz wykazałam ich poprawność.

W artykule 12 wraz z dr Andrzejem Zbrzezny zaproponowałam i zdefiniowałam metodę OWM dla egzystencjalnego fragmentu LTL rozszerzonego o operatory epistemiczne (ELTLK) oraz dla systemów wieloagentowych modelowanych przez przeplotowe systemy interpretowane (ang. *interleaved interpreted systems*). Przedstawiłam również dowód poprawności zaproponowanej metody, tj. dowód na równoważność semantyk ograniczonej i nieograniczonej oraz dowód poprawności translacji problemu weryfikacji modelowej dla ELTLK do problemu SAT. Oryginalność tej pracy polega na rozszerzeniu metody OWM dla LTL do pracy z własnościami wyrażalnymi w ELTLK. Główna trudność polegała tutaj na konieczności rozważania zbioru wykonań/obliczeń/ścieżek systemu w celu odnalezienia świadka dla danej własności. Miało to konsekwencje w sposobie traktowania ścieżek będących pętlami i tych, które pętlami nie są. Różne podejścia miały konsekwencje w efektywności zaproponowanej metody OWM.

W artykule 13 wraz z dr Andrzejem Zbrzezny zaproponowałam, zdefiniowałam i udowodniłam translację problemu egzystencjalnej weryfikacji modelowej dla MITL (ang. *Metric Interval Temporal Logic*) z semantyką gęstą do problemu weryfikacji modelowej dla języka HLTL z semantyką dyskretną. Język HLTL, to wariant LTL, w którym operator następnego kroku (*neXt*) został zastąpiony indeksowanym operatorem resetującym  $H_k$ . Celem nowego operatora jest poprawne ustawienie wartości

zmiennych zegarowych wzdłuż danego wykonania systemu. Oryginalność tej pracy polega na zaproponowaniu translacji problemu weryfikacji modelowej dla liniowej logiki czasu rzeczywistego do problemu weryfikacji modelowej dla liniowej logiki czasu dyskretnego. Nigdy wcześniej takiej translacji nie wykonano, a daje ona możliwość wykorzystania technik weryfikacyjnych znanych dla LTL do weryfikacji MITL.

Reasumując, w zbiorze artykułów, które zaliczam do mojej pracy habilitacyjnej, zaproponowałam, zdefiniowałam i udowodniłam poprawność serii metod ograniczonej weryfikacji modelowej, wykorzystujących translację do SAT, dla systemów z czasem oraz systemów wieloagentowych. Rozważane systemy z czasem modelowane były przez automaty czasowe, a systemy wieloagentowe modelowane były albo przez standardowe systemy interpretowane, albo przez przepłotowe systemy interpretowane, albo ich deontyczne odpowiedniki. Ponadto zaproponowałam kilka formalizmów logicznych do modelowania własności systemów wieloagentowych, w tym wyspecjalizowaną logikę do opisu własności protokołów kryptograficznych, która uzyskała uznanie środowiska wieloagentowego skupionego wokół prestiżowej konferencji AAMAS.

Każda z zaproponowanych technik ograniczonej weryfikacji modelowej została zaimplementowana przez dr Andrzeja Zbrzezego, mojego wieloletniego współpracownika. Implementacja rozszerzenia funkcjonalności narzędzia MCMAS została wykonana przez dr Franco Raimondi. Ja aktywnie uczestniczyłam w rozwijaniu i debugowaniu powyżej wymienionych implementacji, przygotowywałam studium przypadków (proponowałam i modelowałam systemy oraz własności do testowania), implementowałam, bądź byłam współautorem implementacji proponowanych przykładów.

Implementacja każdej z zaproponowanych metod ograniczonej weryfikacji modelowej została dołączona jako oddzielny moduł do systemu VerICS, laureata konkursu *Jakość Roku 2010*. VerICS jest narzędziem służącym do weryfikacji poprawności systemów czasu rzeczywistego, systemów wieloagentowych oraz systemów specyfikowanych w językach programowania takich jak Estelle, Java, Promela i UML. VerICS został opracowany i jest rozwijany pod kierunkiem prof. Wojciecha Penczka w Instytucie Podstaw Informatyki PAN w Warszawie. Główna oryginalność systemu polega na nowatorskim zastosowaniu metody ograniczonej weryfikacji modelowej wykorzystującej translację do problemu SAT.

## 4 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Załącznik 3: Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki.

### Literatura

- [1] R. Alur, C. Courcoubetis, and D. Dill. Model checking for real-time systems. In *Proceedings of the 5th Symposium on Logic in Computer Science (LICS'90)*, pages 414–425. IEEE, 1990.
- [2] R. Alur, C. Courcoubetis, and D. Dill. Model checking in dense real-time. *Information and Computation*, 104(1):2–34, 1993.
- [3] R. Alur and D. Dill. Automata-theoretic verification of real-time systems. In *Formal Methods for Real-Time Computing, Trends in Software Series*, pages 55–82. John Wiley & Sons, 1996.
- [4] M. Benedetti and A. Cimatti. Bounded model checking for Past LTL. In *Proceedings of the 9th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS'03)*, volume 2619 of *LNCS*, pages 18–33. Springer-Verlag, 2003.
- [5] J. Bengtsson, B. Jonsson, J. Lilius, and W. Yi. Partial order reductions for timed systems. In *Proceedings of the 9th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR'98)*, volume 1466 of *LNCS*, pages 485–500. Springer-Verlag, 1998.
- [6] A. Biere, A. Cimatti, E. Clarke, O. Strichman, and Y. Zhu. Bounded model checking. In *Highly Dependable Software*, volume 58 of *Advances in Computers*. Academic Press, 2003. Pre-print.

- [7] A. Biere, A. Cimatti, E. Clarke, and Y. Zhu. Symbolic model checking without BDDs. In *Proceedings of the 5th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS'99)*, volume 1579 of *LNCS*, pages 193–207. Springer-Verlag, 1999.
- [8] A. Biere, K. Heljanko, T. Junttila, T. Latvala, and V. Schuppan. Linear encodings of bounded LTL model checking. *Logical Methods in Computer Science*, 2(5:5):1–64, 2006.
- [9] A. Bolotov, A. Basso, and O. Grigoriev. Deontic extension of deductive verification of component model: Combining computation tree logic and deontic logic in natural deduction style calculus. In *Proceedings of the 4th Indian International Conference on Artificial Intelligence (IICAI 2009)*, pages 166–185, 2009.
- [10] I. Boureanu, A. V. Jones, and A. Lomuscio. Automatic verification of epistemic specifications under convergent equational theories. In *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2012)*, volume 2, pages 1141–1148. IFAAMAS, 2012.
- [11] R. Bryant. Graph-based algorithms for boolean function manipulation. *IEEE Transaction on Computers*, 35(8):677–691, 1986.
- [12] R. Bryant. Binary Decision Diagrams and beyond: Enabling technologies for formal verification. In *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD'95)*, pages 236–243, 1995.
- [13] J. R. Burch, E. M. Clarke, K. L. McMillan, D. L. Dill, and L. J. Hwang. Symbolic model checking:  $10^{20}$  states and beyond. *Information and Computation*, 98(2):142–170, 1992.
- [14] G. Cabodi, P. Camurati, and S. Quer. Can BDD compete with SAT solvers on bounded model checking? In *Proc. of the 39th Design Automation Conference (DAC'02)*, pages 117–122, 2002.
- [15] S. Chaki, E. M. Clarke, J. Ouaknine, N. Sharygina, and N. Sinha. Concurrent software verification with states, events, and deadlocks. *Formal Aspects of Computing*, 17(4):461–483, 2005.
- [16] P. Chauhan, E. M. Clarke, J. H. Kukula, S. Sapra, H. Veith, and D. Wang. Automated abstraction refinement for model checking large state spaces using SAT based conflict analysis. In *Proceedings of the 4th International Conference on Formal Methods in Computer-Aided Design (FMCAD'02)*, volume 2517 of *LNCS*, pages 33–51. Springer, 2002.
- [17] E. Clarke, R. Enders, T. Filkorn, and S. Jha. Exploiting symmetry in temporal logic model checking. *Formal Methods in System Design*, 9:77–104, 1996.
- [18] E. Clarke, O. Grumberg, S. Jha, Y. Lu, and H. Veith. Counterexample-guided abstraction refinement. In *Proceedings of the 12th International Conference on Computer Aided Verification (CAV'2000)*, volume 1855 of *LNCS*, pages 154–169. Springer, 2000.
- [19] E. Clarke, O. Grumberg, S. Jha, Y. Lu, and H. Veith. Counterexample-guided abstraction refinement for symbolic model checking. *Journal ACM*, 50:752–794, September 2003.
- [20] E. Clarke, A. Gupta, and O. Strichman. SAT based counterexample-guided abstraction-refinement. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 23(7):1113–1123, 2004.
- [21] E. M. Clarke, O. Grumberg, and D. Long. Model checking and abstractions. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 16(5):1512–1542, 1994.
- [22] E. M. Clarke, O. Grumberg, and D. A. Peled. *Model Checking*. The MIT Press, 1999.
- [23] E. M. Clarke, S. J., Y. Lu, and H. Veith. Tree-like counterexamples in model checking. In *Proceedings of the 17th IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS'2002)*, pages 19–29. IEEE Computer Society, 2002.



- [24] Edmund M. Clarke and Helmut Veith. Counterexamples revisited: Principles, algorithms, applications. In *Verification: Theory and Practice*, volume 2772 of *LNCS*, pages 208–224. Springer, 2003.
- [25] M. Cohen and M. Dam. A complete axiomatization of knowledge and cryptography. In *Proceedings of the 22nd Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2007)*, pages 77–86. IEEE Computer Society, 2007.
- [26] M. Cohen, M. Dam, A. Lomuscio, and H. Qu. A data symmetry reduction technique for temporal-epistemic logic. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Automated Technology for Verification and Analysis, ATVA '09*, pages 69–83. Springer-Verlag, 2009.
- [27] M. Cohen, M. Dam, A. Lomuscio, and F. Russo. Abstraction in model checking multi-agent systems. In *Proceedings of the 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 2, AAMAS '09*, pages 945–952. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2009.
- [28] F. Copt, L. Fix, R. Fraer, E. Giunchiglia, G. Kamhi, A. Tacchella, and M. Vardi. Benefits of bounded model checking at an industrial setting. In *Proceedings of the 13th International Conference on Computer Aided Verification (CAV'01)*, volume 2102 of *LNCS*, pages 436–453. Springer-Verlag, 2001.
- [29] D. Dams, O. Grumberg, and R. Gerth. Abstract interpretation of reactive systems: Abstractions preserving ACTL\*, ECTL\* and CTL\*. In *Proceedings of the IFIP Working Conference on Programming Concepts, Methods and Calculi (PROCOMET'94)*. Elsevier Science Publishers, 1994.
- [30] Catalin Dima. Positive and negative results on the decidability of the model-checking problem for an epistemic extension of timed CTL. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME'09)*, pages 29–36. IEEE Computer Society, 2009.
- [31] E. A. Emerson and C. S. Jutla. Symmetry and model checking. In *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Aided Verification (CAV'93)*, volume 697 of *LNCS*, pages 463–478. Springer-Verlag, 1993.
- [32] E. A. Emerson, K. A. Mok, A. P. Sistla, and J. Srinivasan. Quantitative temporal reasoning. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Aided Verification (CAV'90)*, pages 136–145, London, UK, 1991. Springer-Verlag.
- [33] E. A. Emerson and A. P. Sistla. Symmetry and model checking. *Formal Methods in System Design*, 9:105–131, 1996.
- [34] E. A. Emerson and R. J. Treffer. From asymmetry to full symmetry: New techniques for symmetry reduction in model checking. In *Proceedings of the 10th Conference on Correct Hardware Design and Verification Methods (CHARME'99)*, volume 1703 of *LNCS*, pages 142–156. Springer-Verlag, 1999.
- [35] R. Fagin, J. Y. Halpern, Y. Moses, and M. Y. Vardi. *Reasoning about Knowledge*. MIT Press, Cambridge, 1995.
- [36] R. Fagin, J.Y. Halpern, Y. Moses, and M. Y. Vardi. *Reasoning about Knowledge*. MIT Press, 1995.
- [37] H. Gao, H. Miao, S. Chen, and J. Mei. Applying Bounded Model Checking to Verifying Web Navigation Model. In *Computer and Information Science 2011*, volume 364 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 1–15. Springer-Verlag, 2011.
- [38] S. Graf and H. Saïdi. Construction of abstract state graphs with PVS. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Aided Verification (CAV '97)*, volume 1254 of *LNCS*, pages 72–83. Springer-Verlag, 1997.

- [39] K. Heljanko and I. Niemelä. Bounded LTL model checking with stable models. In *Proceedings of the 6th International Conference on Logic Programming and Nonmonotonic Reasoning (LPNMR'2001)*, volume 2173 of *LNCS*, pages 200–212. Springer-Verlag, 2001.
- [40] Holger Hermanns, Björn Wachter, and Lijun Zhang. Probabilistic CEGAR. In *Proceedings of the 20th International Conference on Computer Aided Verification (CAV'2008)*, volume 5123 of *LNCS*, pages 162–175. Springer, 2008.
- [41] W. van der Hoek and M. Wooldridge. Model checking knowledge and time. In *SPIN 2002 – Proceedings of the Ninth International SPIN Workshop on Model Checking of Software*, Grenoble, France, April 2002.
- [42] C. Norris Ip and David L. Dill. Better verification through symmetry. *Formal Methods System Design*, 9:41–75, 1996.
- [43] K. Jensen. Condensed state spaces for symmetrical coloured petri nets. *Formal Methods in System Design*, 9:7–40, August 1996.
- [44] A. Jones and A. Lomuscio. A BDD-based BMC approach for the verification of multi-agent systems. In L. Czaaja, editor, *Proc. of the Int. Workshop on Concurrency, Specification and Programming (CS&P'09)*, volume 1, pages 253–264. Warsaw University, 2009.
- [45] M. Kacprzak, A. Lomuscio T. Lasica, W. Penczek, and M. Szreter. Verifying multiagent systems via unbounded model checking. In *Proc. of the 3rd NASA Workshop on Formal Approaches to Agent-Based Systems (FAABS III)*, volume 3228 of *LNCS*, pages 189–212. Springer-Verlag, 2004.
- [46] S. Kemper and A. Platzer. SAT-based abstraction refinement for real-time systems. *Electronic Notes Theoretical Computer Science*, 182:107–122, 2007.
- [47] M. Knapik and W. Penczek. Bounded model checking for parametric timed automata. In *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency V*, volume 6900 of *LNCS*, pages 141–159. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [48] N. Kobayashi, R. Sato, and H. Unno. Predicate abstraction and CEGAR for higher-order model checking. In *Proceedings of the 32nd ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI'2011)*, pages 222–233. ACM, 2011.
- [49] S. Kramer. Cryptographic protocol logic: Satisfaction for (timed) dolev–yao cryptography. *The Journal of Logic and Algebraic Programming*, 77(1–2):60–91, 2008.
- [50] A. Lomuscio, W. Penczek, and H. Qu. Partial order reductions for model checking temporal-epistemic logics over interleaved multi-agent systems. *Fundamenta Informaticae*, 101:71–90, January 2010.
- [51] A. Lomuscio and M. Sergot. Extending interpreting systems with some deontic concepts. In *Proceedings of the 8th International Conference on Theoretical Aspects of Rationality and Knowledge (TARK 2001)*, pages 207–218. Morgan Kaufman, 2001.
- [52] A. Lomuscio and M. Sergot. Deontic interpreted systems. *Studia Logica*, 75(1):63–92, 2003.
- [53] A. Lomuscio and M. Sergot. A formalisation of violation, error recovery, and enforcement in the bit transmission problem. *Journal of Applied Logic*, 2(1):93–116, 2004.
- [54] A. Lomuscio and B. Woźna. A complete and decidable security-specialised logic and its application to the TESLA protocol. In *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS'06)*, pages 145–152. ACM Press, 2006.
- [55] K. McMillan. *Symbolic model checking: An approach to the state explosion problem*. Kluwer Academic Publishers, 1993.

- [56] K. L. McMillan. Applying SAT methods in unbounded symbolic model checking. In *Proc. of the 14th Int. Conf. on Computer Aided Verification (CAV'02)*, volume 2404 of *LNCS*, pages 250–264. Springer-Verlag, 2002.
- [57] M. Minea. Partial order reductions for model checking of Timed Automata. In *Proceedings of the 10th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR'99)*, volume 1664 of *LNCS*, pages 431–446. Springer-Verlag, 1999.
- [58] M.A. Orgun, G. Governatori, and Ch. Liu. Modal tableaux for verifying stream authentication protocols. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 19(1):53–75, 2009.
- [59] I. Ouranos, K. Ogata, and P. Stefaneas. Formal analysis of TESLA protocol in the timed OTS/CafeOBJ method. In *Proceedings of the 5th International Conference on Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation: applications and case studies (ISoLA'2012)*, volume 7610 of *LNCS*, pages 126–142. Springer-Verlag, 2012.
- [60] D. Peled. Partial order reduction: Linear and branching temporal logics and process algebras. In *Proceedings of Partial Order Methods in Verification (POMIV'96)*, volume 29 of *ACM/AMS DIMACS Series*, pages 79–88. American Mathematical Society, 1996.
- [61] D. Peled. Partial order reductions: Model checking using representatives. In *Proceedings of the 21st International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS'96)*, volume 1113 of *LNCS*, pages 93–112. Springer-Verlag, 1996.
- [62] W. Penczek and A. Lomuscio. Verifying epistemic properties of multi-agent systems via bounded model checking. In *Proceedings of the Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent systems (AAMAS'03)*, pages 209–216. ACM, 2003.
- [63] W. Penczek and A. Lomuscio. Verifying epistemic properties of multi-agent systems via bounded model checking. *Fundamenta Informaticae*, 55(2):167–185, 2003.
- [64] W. Penczek, M. Szreter, R. Gerth, and R. Kuiper. Improving partial order reductions for universal branching time properties. *Fundamenta Informaticae*, 43:245–267, 2000.
- [65] W. Penczek, B. Woźna, and A. Zbrzezny. Bounded model checking for the universal fragment of CTL. *Fundamenta Informaticae*, 51(1-2):135–156, 2002.
- [66] F. Raimondi and A. Lomuscio. Automatic verification of multi-agent systems by model checking via ordered binary decision diagrams. *Journal of Applied Logic*, 5(2):235–251, 2007.
- [67] L. Shigong. Protocol analysis through alternating-time temporal logic and timed Petri net models. In *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless communications, networking and mobile computing (WiCOM 2009)*, pages 4627–4630. IEEE Press, 2009.
- [68] Yoav Shoham and Kevin Leyton-Brown. *Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press, 2009.
- [69] A. Valmari. Stubborn sets for reduced state space generation. In *Proceedings of the International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (ICATPN'89)*, volume 483 of *LNCS*, pages 491–515. Springer-Verlag, 1989.
- [70] Farn Wang. Efficient model-checking of dense-time systems with time-convexity analysis. *Theoretical Computer Science*, 467:89 – 108, 2013.
- [71] G. Weiss. *Multi-agent systems*. MIT Press, 1999.
- [72] Harro Wimmel and Karsten Wolf. Applying CEGAR to the petri net state equation. In *Proceedings of the 17th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS'2011)*, volume 6605 of *LNCS*, pages 224–238. Springer, 2011.

- [73] P. Wolper and P. Godefroid. Partial-order methods for temporal verification. In *Proceedings of the 4th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR'93)*, volume 715 of *LNCS*, pages 233–246. Springer-Verlag, 1993.
- [74] M. Wooldridge. *An introduction to multi-agent systems*. John Wiley, England, 2002.
- [75] B. Woźna, A. Lomuscio, and W. Penczek. Bounded model checking for knowledge and real time. In *Proceedings of the 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent systems (AAMAS'05)*, volume I, pages 165–172. ACM Press, July 2005.
- [76] B. Woźna and A. Zbrzezny. Checking ACTL\* properties of discrete timed automata via bounded model checking. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Formal Analysis and Modeling of Timed Systems (FORMATS'03)*, volume 2791 of *LNCS*, pages 18–33. Springer-Verlag, 2004.
- [77] B. Woźna-Szcześniak. Bounded model checking for the existential part of real-time CTL and knowledge. In *Advances in Software Engineering Techniques - 4th IFIP TC 2 Central and East European Conference on Software Engineering Techniques, CEE-SET'2009. Revised Selected Papers*, volume 7054 of *LNCS*, pages 164–178. Springer, 2009.
- [78] W.L. Yeung. Formal verification of negotiation protocols for multi-agent manufacturing systems. *International journal of production research*, 49(12):3669–3690, 2011.
- [79] A. Zbrzezny. Improving the translation from ECTL to SAT. *Fundamenta Informaticae*, 85(1–4):513–531, 2008.
- [80] A. Zbrzezny. A new translation from ECTL\* to SAT. *Fundamenta Informaticae*, 120(3-4):377–397, 2012.

*Bogna Woźna - Szcześniak*