

**Agnieszka LASOTA**

UNIwersytet Zielonogórski, Wydział Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji,  
ul. prof. Z. Szafrana nr 2, 65-516 Zielona Góra

## Metodologia modyfikacji sieci obrazujących proces produkcyjny zawierający punkty kontroli jakości

Mgr inż. Agnieszka LASOTA

Ukończone studia: Informatyka - specjalność Inżynieria Oprogramowania, Mechanika i Budowa Maszyn - specjalność: Eksploatacja i Marketing Pojazdów Samochodowych oraz Technologia Maszyn. Wszczęty przewód doktorski w dyscyplinie Informatyka nt. Modelowanie procesów produkcyjnych z wykorzystaniem diagramów aktywności i sieci Petriego typu P/T. Jest stypendystą w ramach Działania 8.2 „Transfer wiedzy”, Priorytetu VIII „Regionalne Kadry Gospodarki” Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.

e-mail: a.lasota@weit.uz.zgora.pl



### Streszczenie

Artykuł pokazuje jaki wpływ na poprawność procesu produkcyjnego ma wprowadzenie do jego realizacji punktów kontroli jakości. Weryfikacja oddziaływania tych zmian w procesach realizowanych wspólnie odbywa przy wykorzystaniu sieci Petriego. Pośrednia kontrola jakości może przyczynić się do powstania błędów w strukturze procesu. W celu zobrazowania sposobu korekacji możliwych błędów behawioralnych sieci w pracy zaproponowano przykładowe rozwiązania poprzez wskazanie metodologii modyfikacji sieci.

**Słowa kluczowe:** sieci Petriego,  $s$ -sieci,  $\alpha$ -sieci, proces produkcyjny, kontrola jakości.

### Modification methodology of nets illustrating the production process including quality control points

#### Abstract

Quality control in the production process is one of the key moments and is compulsory, since it determines the quality of the completed product. The paper shows how the quality control accomplishment affects the process correctness. Indirect control of the quality may cause errors in the structure of the process. Convenient way to verify the behavioral correctness of the production process is its modeling by Petri nets. In order to depict the manner of the correction of possible errors in the paper the sample solutions are demonstrated. Studies have shown that Petri nets are a convenient tool for validation of behavioral correctness of the production processes. For carrying on the analysis it was necessary to propose modifications of the nets. The methodology adopts two input sets of data. The first one corresponds to Petri nets with single-token initial marking, called  $s$ -nets, while the second is  $\alpha$ -nets ( $s$ -nets belong to the class of extended free-choice nets). In the proposed method it is required to restart execution of the process, in the case of detection of deviations from the quality standards. Such restarting is implemented through the introduction of the additional transitions, which move tokens from the critical places to the initially marked place.

**Keywords:** Petri nets,  $s$ -nets,  $\alpha$ -nets, production process, quality control.

## 1. Wprowadzenie

Realizacja procesu produkcyjnego jest możliwa, jeżeli proces jest wykonywany poprawnie, czyli odpowiadająca mu sieć jest bezpieczna, żywa i powtarzalna. Na etapie projektowania procesu produkcyjnego technolog posiada informacje określające technologiczną kolejność zdarzeń realizowaną w sposób sekwencyjny. W momencie przeobrażania prototypowego procesu produkcyjnego w produkcję seryjną, istotnym jest takie zaplanowanie działań, by jak największa część z nich mogła być wykonywana wspólnie. Automatycznie pojawia się niebezpieczeństwo zachwiania poprawności wykonywanego procesu. Kontrola jakości w procesie produkcyjnym jest jednym z kluczowych momentów i jest obowiązkowa, gdyż decyduje o jakości wykonanego wyrobu.

Wykonywana jest na zakończenie każdego procesu produkcyjnego, jednakże jej wynik nie wpływa na poprawność struktury realizowanego procesu, gdyż końcowy produkt trafia do magazynu sprzedaży lub do magazynu odpadów. Sytuacja inaczej się przedstawia, jeżeli kontrola jakości jest niezbędna w trakcie realizacji procesu. Pośrednia kontrola jakości może przyczynić się do powstania błędów w strukturze procesu. Dogodnym sposobem weryfikacji poprawności behawioralnej procesu produkcyjnego jest przedstawienie procesu produkcyjnego za pomocą sieci Petriego. W celu zobrazowania sposobu korekacji możliwych błędów behawioralnych sieci w pracy zaproponowano przykładowe rozwiązania.

## 2. Podstawy teoretyczne

Przeprowadzone badania wykazały, iż sieci Petriego stanowią dogodne narzędzie do analizy poprawności behawioralnej procesu produkcyjnego. Niezbędnym do przeprowadzenia przedmiotowej analizy okazało się zaproponowanie metodologii modyfikacji sieci Petriego, w której przyjęto dwa zbiory danych wyjściowych. Pierwszy jest nazwany  $s$ -sieciami, natomiast drugi to  $\alpha$ -sieci.

### 2.1. Proces produkcyjny

Materiały, półfabrykaty i części zespołów oraz skończony zbiór działań niezbędnych do wytworzenia gotowego wyrobu rozumiane są jako proces produkcyjny, który realizowany jest zgodnie ze specyfikacją technologiczną. Ciąg następujących po sobie i od siebie zależnych operacji niezbędnych do wytworzenia w sposób zautomatyzowany gotowego produktu odpowiada metodologii modelowania procesu produkcyjnego.

### 2.2. Sieć Petriego

Przez sieć Petriego  $\Sigma=(P,T,F,M_0)$  rozumiemy uporządkowaną czwórkę składającą się ze:

- skończonych zbiorów miejsc  $P$  i tranzycji  $T$ , gdzie iloczyn zbioru miejsc przez zbiór tranzycji stanowi zbiór pusty ( $P \cap T = \emptyset$ ),
- relacji będącej podzbiorem sumy iloczynów kartezyjskich miejsc i tranzycji  $F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$ ,
- znakowania początkowego  $M_0$ .

W poszczególnych miejscach sieci mogą znajdować się znaczniki nazwane *znakowaniem* sieci, które jest funkcją odwzorowującą zbiór liczb naturalnych wraz z zerem na skończonym zbiorze miejsc sieci  $M: P \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\}$ . Jeżeli w danym miejscu znajduje się co najmniej jeden znacznik to takie miejsce nazywa się *oznakowanym*. Jeżeli każde miejsce wejściowe tranzycji będzie zawierało znacznik oznacza to, że tranzycja jest *aktywna* i może zostać zrealizowana. Realizacja tranzycji następuje poprzez zabranie znacznika z każdego z miejsc wejściowych i dodanie znacznika do każdego z miejsc wyjściowych tranzycji.

### 2.3. $s$ -sieci

Sieci Petriego z jednym znacznikiem w znakowaniu początkowym nazywane są  *$s$ -sieciami*, analogicznie jak to zostało przyjęte w pracy [4].

### 2.4. $\alpha$ -sieci

Sieć Petriego nazwana jest  *$\alpha$ -siecią* jeżeli w znakowaniu początkowym znajduje się dokładnie jeden znacznik a dowolne dwa

miejsca sieci, które mają wspólną tranzycję wyjściową mają równe zbiory tranzycji wyjściowych, tj.  $\forall p_1 \in P, p_2 \in P: (t \in p_1^*, t \in p_2^*) \Rightarrow (p_1^* = p_2^*)$  [2, 3, 4, 6].  $\alpha$ -sieci to sieci Petriego będące podzbiorem  $s$ -sieci.

## 2.5. Właściwości $s$ -sieci i $\alpha$ -sieci

Jeżeli dochodzi do sytuacji, że w danym znakowaniu żadna tranzycja nie jest aktywna oznacza to, że wystąpiła *blokada sieci*. Jeżeli w każdym z osiągalnych znakowań żadne miejsce nie zawiera więcej niż jeden znacznik oznacza to, iż sieć jest *bezpieczna*. Jeżeli dla każdej tranzycji, z każdego osiągalnego znakowania ze znakowania początkowego, osiągalne jest znakowanie, w którym tranzycja może zostać zrealizowana oznacza to, iż sieć jest *żywa*, a gdy znakowanie początkowe jest osiągalne z każdego osiągalnego znakowania to taka sieć jest *powtarzalna*.  $s$ -sieć żywa i bezpieczna jest siecią powtarzalną czyli dobrze zbudowaną [4, 5].

Tab. 1. Gramatyka sieci Petriego

Tab. 1. Components of Petri nets

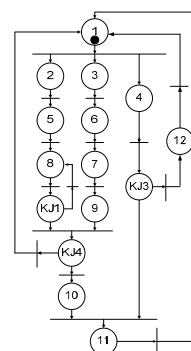
Nazwa komponentu $\alpha$ -sieci	Symbol graficzny
Miejsce	○
Tranzycja	⊥
Łuk	→

Proces produkcyjny, rozumiany jako uporządkowany zestaw celowych czynności wykonywanych w toku produkcji, można przedstawić za pomocą  $s$ -sieci jako dwudzielny skierowany graf, w którym miejsca i tranzycje stanowią możliwe rodzaje wierzchołków.

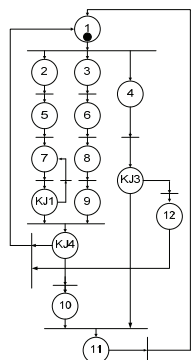
## 3. Metodologia modyfikacji sieci

Na wstępie weryfikacji zaproponowanego podejścia zostały ustalone warunki początkowe. Przyjęto, iż najbardziej adekwatną do procesów produkcyjnych siecią Petriego jest  $s$ -sieć oraz  $\alpha$ -sieć. Weryfikacja sieci równoważnej procesowi produkcyjnemu, pod względem poprawności behawioralnej pozwala stwierdzić czy sieć jest dobrze zbudowana. W celu zobrazowania metodologii możliwych modyfikacji sieci zawierających błędy behawioralne skupiono się wyłącznie na zaproponowaniu struktur możliwych realizacji procesów produkcyjnych. Przyjęty dla przejrzystości analizy moment kontroli jakości został na schematach oznaczony jako „KJ” a moment synchronizacji tranzycji jako „S”. Nieistotnym, z punktu zobrazowania zaproponowanych rozwiązań, okazał się charakter zdarzeń wskazanych w pozostałych miejscach sieci. Omawiane przypadki w większości przedstawiają analizę  $s$ -sieci, gdyż dowolne dwa miejsca sieci, które mają wspólną tranzycję wyjściową nie mają równych zbiorów tranzycji wyjściowych, co jest wymagane by sieć mogła być zakwalifikowana do klasy  $\alpha$ -sieci co jest wynikiem konieczności wprowadzenia w realizację procesu produkcyjnego punktów kontroli jakości. Jednocześnie oczywistą staje się sytuacja, w której może dojść do stanu, w którym kontrola jakości nie potwierdzi zgodności elementów zespołu z wymaganiami technologicznymi. W takim przypadku nieodzownym staje się fakt zaplanowania w procesie rozwiązania gwarantującego uzyskanie oczekiwanej realizacji procesu. Sposobem w najmniejszym stopniu zakłócającym ciągłość realizacji procesu jest skierowanie wadliwego produktu wraz z sąsiadującymi podzespołami do magazynu początkowego i ponowne rozpoczęcie realizacji procesu. Rysunki 1-3 przedstawiają sposób modyfikacji sieci aż do momentu uzyskania sieci dobrze zbudowanej. Rys. 1 przedstawia sieć, która nie jest bezpieczna. Sytuacja taka następuje, jeżeli w wyniku przeprowadzenia kontroli KJ3 znacznik powróci do początku realizacji procesu, a znacznik z miejsca P10 nie może zostać przekazany do P11. Jeżeli kontrola KJ3 jest niezbędna to sposób rozwiązania zapewniający bezpieczną realizację sieci przedstawia rys. 2. Analogicznie sytuacja

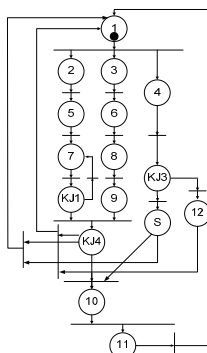
przedstawia się w zakresie kontroli KJ4, w przypadku której po skierowaniu znacznika do P1 tranzycja z miejsca KJ3 może oczekiwać na realizację, jeżeli w wyniku kontroli znacznik nie zostanie skierowany do P1. Tylko w przypadku jednoczesnego błędu na etapie realizacji procesu wykrytego w trakcie kontroli KJ3 i KJ4 proces wykona się poprawnie. Punkt kontroli KJ1 w zaproponowanej pierwotnej realizacji procesu nie dyskredytuje poprawności procesu pod względem behawioralnym, może jednakże opóźnić jego realizację, jeżeli niezbędnym okazałoby się konieczność kilkukrotnego przejścia przez miejsce P7.



Rys. 1. Sieć niebezpieczna – przypadek 1  
Fig. 1. Unsafe net – case 1



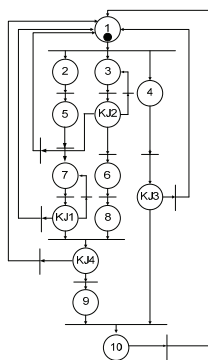
Rys. 2. Sieć bezpieczna, blokada – przypadek 1  
Fig. 2. Safe net, deadlock – case 1



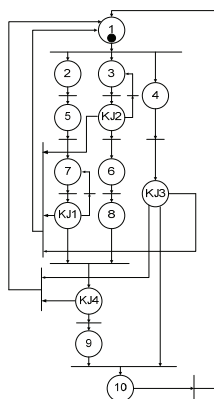
Rys. 3. Sieć dobrze zbudowana – przypadek 1  
Fig. 3. Well-formed net – case 1

Zaproponowana na rys. 2 modyfikacja sieci zapewniła, iż sieć, która uprzednio była siecią niebezpieczną stała się siecią bezpieczną, jednakże jednocześnie wystąpiło zagrożenie pojawienia się blokady sieci. W omawianym przypadku blokada sieci wystąpi w trakcie realizacji procesu, gdy kontrola KJ3 przejdzie pomyślnie natomiast znacznik w P10 się nie pojawi, gdyż w wyniku kontroli KJ4 znacznik zostanie skierowany do P1. Rozwiązanie przedmiotowego przypadku nr 1 przedstawia rys. 3. W momencie niepomyślnego przejścia kontroli KJ3 znacznik z KJ3 i KJ4 kierowany jest do znakowania początkowego, natomiast w przypadku niepomyślnego

kontroli w KJ4 znacznik zostanie przekazany do znakowania początkowego z KJ3 lub S, jeżeli kontrola w KJ3 byłaby pomyślna. Wymuszenie synchronizacji zadań spowoduje, iż *s*-sieć, w której mogłaby nastąpić blokada staje się siecią dobrze zbudowaną. Rozpatrywany przypadek 1 zawiera jeszcze punkt kontroli jakości KJ1. W wyniku stwierdzenia niezgodności wyrobu z normą zakłada się konieczność korekty. Przedstawiony model rozwiązania problemu jednak nie jest zasadny, jeżeli kontrola skorygowanego elementu wykazuje w dalszym ciągu odchyłki od normy obowiązującej dla danego produktu, gdyż korekta nie może trwać w nieskończoność. Rozwiązanie zaistniałego problemu wymaga określenia technologicznego warunku stopu, czyli maksymalnej ilości przejść w celu uzyskania pożądanej jakości. Jednocześnie niezbędnym jest wskazanie alternatywnego rozwiązania, czyli skierowanie znaczników do znakowania początkowego co przedstawia rys. 4. Przypadek 2 zawiera cztery pośrednie punkty kontroli KJ1, KJ2, KJ3, KJ4.

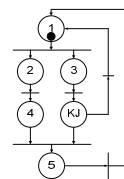


Rys. 4. Sieć niebezpieczna – przypadek 2  
Fig. 4. Unsafe net – case 2

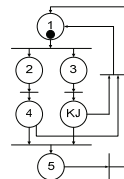


Rys. 5. Sieć dobrze zbudowana – przypadek 2  
Fig. 5. Well-formed net – case 2

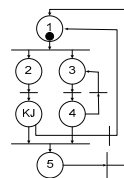
W takim przypadku skoro sieć nie jest dobrze zbudowana niezbędnym jest wprowadzenie modyfikacji sieci polegającej na przekierowaniu miejsc z procesów równoległych do wspólnej tranzycji. Pierwsza wspólna tranzycja jest niezbędna, jeżeli w wyniku kontroli KJ1, KJ2 lub KJ3 znacznik kierowany jest do P1 w związku z czym wspólna tranzycja pobiera znacznik z miejsc KJ1, KJ3. Druga wspólna tranzycja inicjuje pobranie znaczników do znakowania początkowego z miejsc KJ3 i KJ4, jeżeli w którymś z tych miejsc kontrola jakości wykazała odchyłki od normy. By sieć była dobrze zbudowana należy wymusić pobranie znaczników ze wszystkich ścieżek realizowanych wspólnie do znakowania początkowego, nawet jeżeli część kontroli jakości przeszła pomyślnie, co można zaobserwować na rys. 5. Rys. 6 i 8 również przedstawiają przykłady błędnie zamodelowanych procesów produkcyjnych a rys. 7 i 9 wskazują stosowne do błędów modyfikacje.



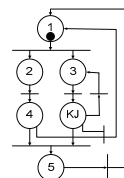
Rys. 6. Sieć niebezpieczna – przypadek 3  
Fig. 6. Unsafe net – case 3



Rys. 7. Sieć bezpieczna – przypadek 3  
Fig. 7. Safe net – case 3

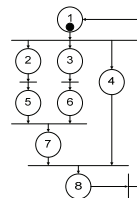


Rys. 8. Sieć niebezpieczna – przypadek 4  
Fig. 8. Unsafe net – case 4



Rys. 9. Sieć bezpieczna – przypadek 4  
Fig. 9. Safe net – case 4

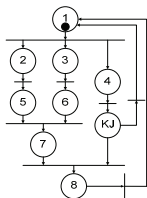
Model sieci przedstawiony na rys. 10 przedstawia realizację procesu produkcyjnego odpowiadającego dobrze zbudowanej  $\alpha$ -sieci. Wprowadzenie punktu kontroli jakości, co zostało pokazane na rys. 11, zmienia strukturę sieci Petriego ze struktury odpowiadającej  $\alpha$ -sieci na strukturę odpowiadającą *s*-sieci. Jednocześnie niestety sieć dobrze zbudowana stała się siecią niebezpieczną, gdyż w przypadku skierowania znacznika z KJ do znakowania początkowego z miejsca P7 nie może zostać zabrany oczekujący w nim znacznik i przekazany do P8. Wskazane rozwiązanie na rys. 12 i 13 przedstawia dwa możliwe warianty modyfikacji *s*-sieci. Wariant pierwszy dla piątego analizowanego przypadku zakłada zabranie znacznika P7 do znakowania początkowego w chwili konieczności przekazania znacznika KJ do P1 w momencie negatywnego wyniku kontroli.



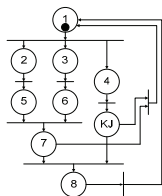
Rys. 10. Sieć bezpieczna ( $\alpha$ -sieć) – przypadek 5  
Fig. 10. Safe net ( $\alpha$ -net) – case 5

Wariant drugi zakłada natomiast zabranie znaczników z P5 i P6 wraz z przekazaniem znacznika z KJ do P1. Zastosowanie wariantu drugiego jest zasadne w przypadku szybszej realizacji ścieżki P1-P4-KJ od pozostałych. Wybór odpowiedniego wariantu realizacji procesu uzależniony jest od specyfikacji technologicznej modelowanego procesu. Wydaje się zasadnym, iż korzystniejszym

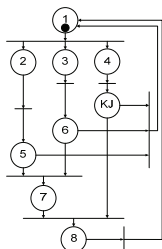
jest stosowanie wariantu drugiego z zaproponowanych dla przypadku piątego modyfikacji. Czynnikiem przemawiającym za II wariantem jest fakt, iż powrót składowych procesu we wcześniejszej fazie przetwarzania do magazynu przyspiesza czas oraz zwiększa możliwości ich ponownego zastosowania.



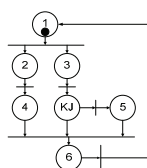
Rys. 11. Sieć niebezpieczna (s-sieć) – przypadek 5  
Fig. 11. Net not safe (s-net) – case 5



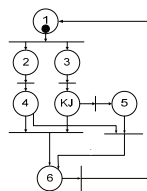
Rys. 12. Sieć bezpieczna (s-sieć) wariant I – przypadek 5  
Fig. 12. Net safe (s-net) variant I – case 5



Rys. 13. Sieć bezpieczna (s-sieć) wariant II – przypadek 5  
Fig. 13. Net safe (s-net) variant II – case 5



Rys. 14. Sieć nieżywa – przypadek 1  
Fig. 14. Net not live – case 1



Rys. 15. Sieć żywa – przypadek 1  
Fig. 15. Net live – case 1

Rys. 14 przedstawia kolejny przykład realizacji procesu produkcyjnego. Wskazane rozwiązanie niestety tym razem powoduje, iż sieć nie jest żywa. W wyniku kontroli jakości znacznik przekazywany jest do P5, w którym następuje korekcja występujących odchyłek od normy. Propozycję modyfikacji procesu produkcyjnego przedstawia rys. 15 na którym pokazano, iż dodanie dodatkowej tranzycji wymusza pobranie znacznika z miejsc równoległych dzięki czemu proces nie zostaje wstrzymany a jego realizacja odbywa się w sposób płynny. Analiza sieci pod kątem jej żywotności w chwili obecnej została ograniczona do jednego przypadku w związku z faktem, iż w analizowanych procesach nie występowało więcej tego typu przypadków.

## 4. Algorytm modyfikacji sieci

Negatywny wynik pośredniej kontroli jakości wymusza przeprowadzenie korekcji wadliwego elementu lub przerwanie cyklu i rozpoczęcie go od nowa co wpływa na poprawną strukturę sieci. Zasadę działania algorytmu doskonale przedstawiają rys. 5 i 15. Jeżeli w wyniku kontroli jakości niezbędna i możliwa jest korekcja wadliwego elementu znacznik kierowany jest do miejsca poprzedzającego kontrolę jakości (rys. 5) lub do miejsca korekcji odchyłek (rys. 15). Skierowanie znacznika do miejsca korekcji odchyłek odbywa się z jednoczesnym wprowadzeniem dodatkowej tranzycji, która pozwoli na zabranie znaczników ze ścieżek równoległych i dalszą realizację procesu. Natomiast jeżeli nie jest możliwy żaden z powyższych wariantów i proces musi zostać przerwany a następnie rozpoczęty od nowa, algorytm modyfikacji sieci zakłada wprowadzenie tranzycji zwrotnej mającej na celu skierowanie wszystkich znaczników, z procesów realizowanych współbieżnie, do znakowania początkowego (rys. 15).

## 5. Wnioski

Poprawność realizacji procesu produkcyjnego jest warunkiem koniecznym do wdrożenia produkcji. Zaproponowany model modyfikacji sieci, tj. procesu produkcyjnego gwarantuje efekt synergii pomiędzy oczekiwaniami a poprawnością realizacji procesu. Zaproponowany wachlarz przykładowych rozwiązań spowoduje zmniejszenie luki w dziedzinie modelowania procesów produkcyjnych. Czynnikiem ograniczającym funkcjonalność zaproponowanych modyfikacji jest brak możliwości określenia zamkniętego katalogu możliwych realizacji procesów produkcyjnych.

Zasada korekcji błędów podczas realizacji procesu produkcyjnego wynikająca z pośredniej kontroli jakości możliwa jest w dwojaki sposób poprzez zastąpienie wadliwego elementu nowym lub rozpoczęcie całego procesu od nowa. Jednakże w przypadku wybrania pierwszego wariantu korekcji błędu pozostałe zadania w procesie oczekują na realizację i wstrzymują możliwość zakończenia procesu. Z tego względu niezasadnym jest przyjmowanie pierwszego wariantu rozwiązania jako słuszny. Z technologicznego punktu widzenia można zaobserwować większą korzyść materiałową w przypadku ponownego zastosowania elementów procesu w powtórny cykl aniżeli wielokrotna korekcja jakości wadliwego elementu.

Praca była współfinansowana z Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej i z budżetu państwa.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Lubuskie  
Warte zachodu

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## 6. Literatura

- [1] Banaszak Z., Kuś J., Adamski M.: Sieci Petriego. Modelowanie, sterowanie i synteza systemów dyskretnych, Zielona Góra: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej, 1993.
- [2] Karatkevich A.: Analiza współbieżnych systemów dyskretnych: zbiory uporczywe vs. symulacja współbieżna, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7, ss. 182-184, 2009.
- [3] Karatkevich A.: Zagadnienia redukcji podsieci automatowych w sieciach Petriego. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6, ss. 806-808, 2008 (V konf. naukowa KNWS'08).
- [4] Karatkevich A.: Dynamic Analysis of Petri Net-Based Discrete Systems. Berlin Heidelberg New York: Springer LNCIS (356), 2007.
- [5] Karatkevich A.: Properties and analysis of  $\alpha$ -nets. Informatyka teoretyczna i stosowana, Rocznik 5, nr 8, ss. 53-64, 2005.
- [6] Zakrevskij A.: High-level design of logical control devices. Zakrevskij A. (ed.) Third Int. Conf. Computer-Aided Design of Discrete Devices, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, ss. 13-18, 1999.