

MODELOWANIE NIEZAWODNOŚCI ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW BIOAGROTECHNICZNYCH

Andrzej Kusz, Andrzej Marciniak

Zakład Modelowania i Systemów Informacyjnych, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Streszczenie. W artykule omówiono metodę modelowania niezawodności złożonych systemów bioagrotechnicznych. Przedstawiono koncepcję modelu niezawodności procesowej opartą na technologii sieci bayesowskich. Niezawodność procesu zdefiniowano jako miarę probabilistyczną na zbiorze wartości pewnego funkcjonału reprezentującego potencjalny plon i jego ewentualny spadek powodowany zagrożeniami biologicznymi i częściowo kształtowany przez warunki klimatyczne i działania interwencyjne. Ewolucję zmian niezawodności procesu odwzorowano korzystając z sieci dynamicznych, które uwzględniają lokalizację w czasie.

Słowa kluczowe: system bioagrotechniczny, niezawodności procesu, dynamiczne sieci bayesowskie

Wstęp

W systemowej konceptualizacji rolniczego procesu produkcyjnego istotną rolę odgrywa rozpropagowane przez profesora Leszka Powierzę pojęcie systemu bioagrotechnicznego. Oznacza ono system, w którym proces produkcyjny jest wynikiem ekspresji kodów genetycznych uprawianej rośliny oraz jej szkodników i konkurentów modyfikowany przez warunki klimatyczne i częściowo kontrolowany poprzez działania technologiczne. Na przykładzie modelowania niezawodności takich procesów pokazano metodę modelowania probabilistycznego. Model wykonano przy użyciu oprogramowania BayesiaLab firmy Bayesia [Bayesia (on line) 2010].

Konceptualizacja niezawodności procesowej

Rolniczy proces produkcyjny narażony jest na szereg zagrożeń, których chwile wystąpienia oraz intensywność mają charakter losowy o rozkładach prawdopodobieństwa warunkowo zależnych od fazy rozwojowej uprawianej rośliny. Zagrożenia te klasyfikujemy na biologiczne i klimatyczne. Na przebieg procesu można częściowo wpływać w trakcie jego trwania poprzez różnorodne działania interwencyjne. Dla uproszczenia zakładamy, że interwencje te są adekwatną reakcją na zagrożenia biologiczne i nie dotyczą warunków klimatycznych. Tym niemniej, warunki klimatyczne są uwzględnione w modelu, ponieważ „uczestniczą” one w kształtowaniu stanu plantacji.

Zgodnie z zasadą modelowania dynamiki procesów za pomocą sieci bayesowskich, tworzymy dwa czasowe przekroje wartości zmiennych: *Zagrożenia biologiczne, Warunki*

klimatyczne i *Stan plantacji*. Przyjmujemy minimalnie wystarczające konceptualizacje dziedzin tych zmiennych: $D(\text{Zagrożenia biologiczne}) = \{\text{nie występuje, poniżej progu szkodliwości, powyżej progu szkodliwości}\}$, $D(\text{Warunki klimatyczne}) = \{\text{neutralne, sprzyjające, niesprzyjające}\}$, $D(\text{Stan plantacji}) = \{\text{bardzo dobry, zadowalający, niezadowalający}\}$. Model ten jest zdefiniowany na dość wysokim poziomie generalizacji. W rzeczywistości każda z omawianych zmiennych reprezentuje podsieć po przejściu do wyższego poziomu szczegółowości. Oznacza to, że rozkłady prawdopodobieństwa nad wartościami tych zmiennych są łącznymi rozkładami prawdopodobieństwa dla zmiennych występujących na wyższym poziomie szczegółowości. Aby w modelu, odwzorować ewolucję zmian niezawodności procesu należy użyć sieci dynamicznych, które uwzględniają lokalizację w czasie a łączny rozkład prawdopodobieństwa nad zbiorem statycznych zmiennych losowych jest zastąpiony przez procesy losowe. Konieczność redukcji złożoności obliczeniowej sprawia, że czas traktujemy jako zbiór wielkości dyskretnych i zakładamy, że stan w chwili późniejszej $t+1$ zależy tylko od stanu chwili wcześniejszej t bezpośrednio ją poprzedzającej. Warunkowe prawdopodobieństwa zmian stanu (intensywność przejść między stanami) mogą być (ale nie muszą) niezmiennie w czasie.

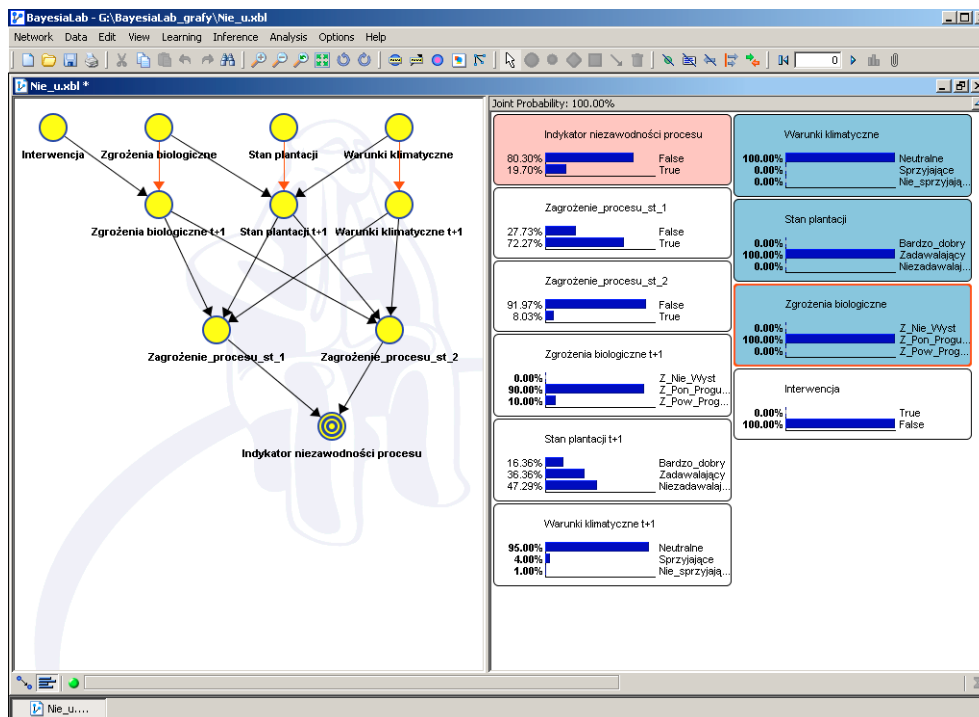
Rozkład prawdopodobieństwa nad wartościami zmiennej *Zagrożenia biologiczne* w chwili $t+1$ (jest warunkowym rozkładem prawdopodobieństwa) i zależy od poziomu zagrożeń biologicznych w chwili t i tego czy przeprowadzone zostało stosowne działanie interwencyjne. Rozkład prawdopodobieństwa nad wartościami zmiennej *Warunki klimatyczne* zależy od warunków klimatycznych w chwili t . Zakładamy tu, że krok czasowy jest wystarczająco krótki aby proces zmian warunków klimatycznych „nie utracił pamięci”. Rozkład prawdopodobieństwa nad zbiorem wartości zmiennej *Stan plantacji* zależy od stanu plantacji w chwili t oraz od poziomu zagrożeń biologicznych i warunków klimatycznych w chwili t .

Niezawodność procesu definiujemy tu jako miarę probabilistyczną na zbiorze wartości pewnego funkcjonału, interpretowanego jako syntetyczny wynik (rezultat) przebiegu całego procesu. W prezentowanej tu konceptualizacji interesuje nas potencjalny plon i jego ewentualny spadek powodowany zagrożeniami biologicznymi i częściowo kształtowany poprzez warunki klimatyczne i interwencje. Funkcjonałem jakości procesu jest tu spadek plonu. Zamiast jednego węzła reprezentującego spadek plonu, dla ułatwienia obliczeń i ich interpretacji wprowadzono dwie zmienne boolowskie: *Zagrożenie procesu w stopniu 1* i *Zagrożenie procesu w stopniu 2*, po czym dokonano ich syntezy poprzez negację ich dysjunkcji reprezentowanej przez zmienną boolowską *Indykator niezawodności procesu*.

Sieć bayesowska modelująca niezawodność procesu

Sieć bayesowska jest siecią probabilistyczną reprezentowaną za pomocą grafu, którego węzły odpowiadają zmiennym losowym a łuki zależnościom między tymi zmiennymi. Wprawdzie w modelach probabilistycznych zależności pomiędzy zmiennymi losowymi nie mają „kierunku” to w sieciach bayesowskich kierunek zależności jest uwzględniony i interpretowany w kategoriach przyczynowo-skutkowych [Pearl 2000]. Zgodnie z przedstawioną wcześniej konceptualizacją niezawodności procesowej odpowiadającą jej sieć bayesowską pokazano na rysunku 1. Na rysunku tym przedstawiono aprioryczne rozkłady prawdopodobieństwa nad zbiorem wartości poszczególnych zmiennych.

Modelowanie niezawodności...



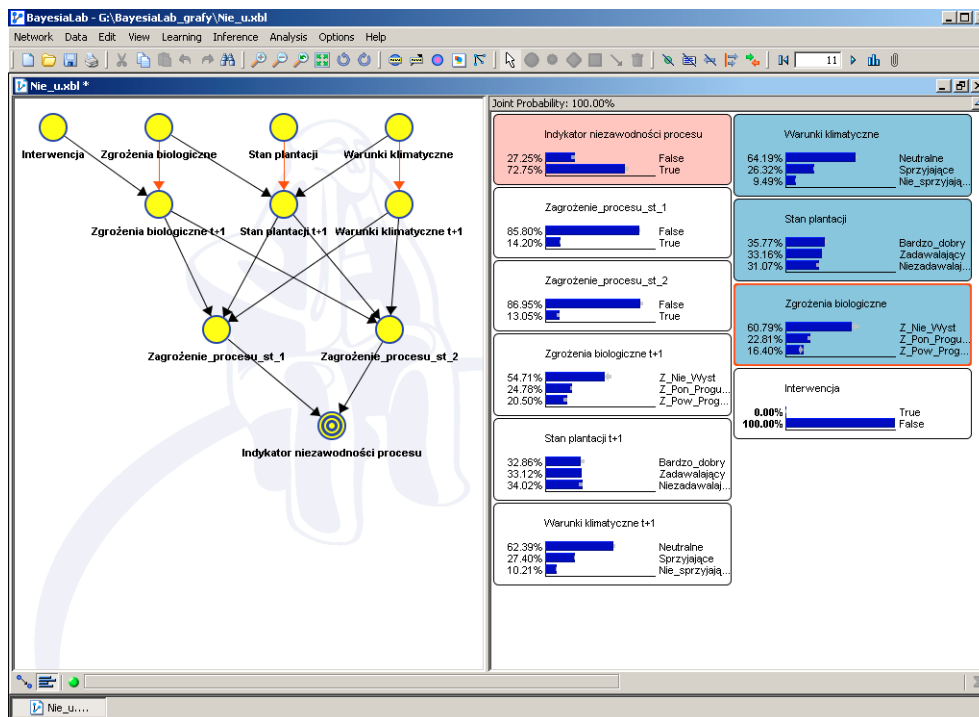
Rys. 1. Sieć bayesowska modelująca dynamikę zagrożeń rolniczego procesu produkcyjnego
 Fig. 1 Bayesian network modelling the dynamics of risks for the agricultural production process

Funkcjonowanie sieci bayesowskiej sprowadza się do dwóch podstawowych mechanizmów inferencyjnych: predykcji zmiennych terminalnych, tj. wyznaczeniu ich warunkowego rozkładu prawdopodobieństwa pod warunkiem że znane są wartości niektórych innych zmiennych. Wartości te mogą być zadane w sposób ostry (twarde fakty) lub rozmyte, fakty znane z dokładnością do rozkładu prawdopodobieństwa.

Drugi mechanizm inferencyjny polega na wyznaczeniu rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych nieterminalnych przy założeniu, że znane są dokładne wartości zmiennych terminalnych. Ten mechanizm wnioskowania (hipotetyczno-dedukcyjny) jest użyteczny przy wyjaśnianiu zaistniałych stanów procesu w kategoriach wcześniejszych przyczyn (zdarzeń). Jest to zarazem mechanizm wnioskowania diagnostycznego.

Przykład obliczeń niezawodności procesowej

Na rysunku 2 pokazano predykcję niezawodności procesu po 11 krokach czasowych. Predykcja dotyczy sytuacji gdy warunki procesu znane są z prawdopodobieństwem 1 (*Warunki klimatyczne = neutralne, Stan plantacji = zadowalający, Zagrożenia biologiczne = poniżej progu szkodliwości*). Rozkłady te odpowiadają informacjom posiadanym w chwili $t=0$.



Rys. 2. Rozkłady prawdopodobieństwa po 11 krokach czasowych
 Fig. 2. Probability distributions after 11 time steps

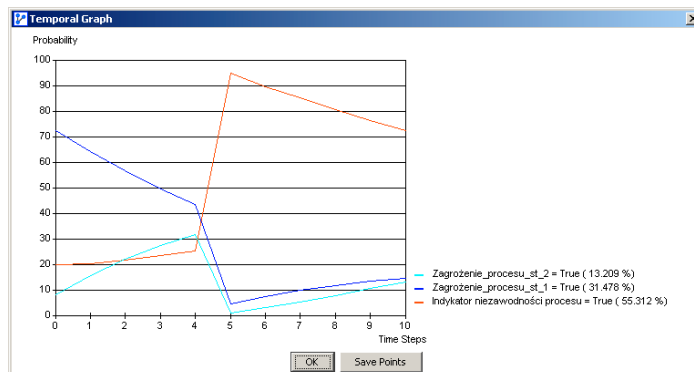
Porównując aprioryczne rozkłady prawdopodobieństwa (rys. 1) z rozkładami po 11 krokach czasowych (rys. 2) można zauważyć jak ewoluuje ryzyko zagrożenia procesu oraz przyjęta miara niezawodności procesu przy założeniu, że nie będzie wykonywana żadna interwencja.

Na rysunku 3 A, B, C przedstawiono ewolucję rozkładów prawdopodobieństwa nad wartościami zmiennych reprezentujących procent utraty plonu oraz zmian wskaźnika niezawodności w przypadku wykonania działania interwencyjnego. Działanie interwencyjne przeprowadzono odpowiednio po 4, 7 i 9 kroku czasowym. Okres symulacji obejmował 10 kroków czasowych.

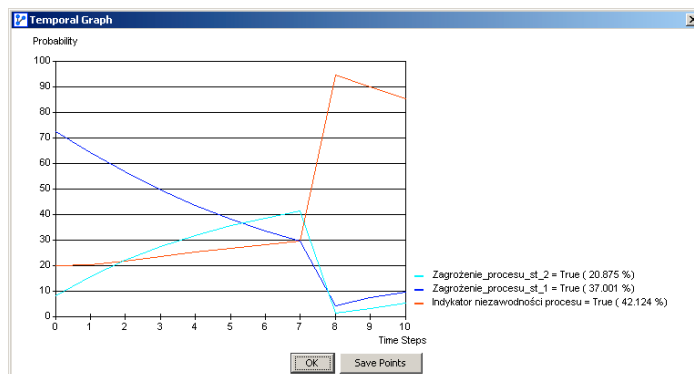
Łatwo zauważyć, że im wcześniej przeprowadzono działanie interwencyjne tym wyższa jest wartość wskaźnika niezawodności procesu produkcyjnego w odniesieniu do fazy fenologicznej. W przypadku wczesnego działania interwencyjnego bardziej prawdopodobna jest niska strata plonu - *Zagrozenie procesu w stopniu 1* niż wysoka strata plonu - *Zagrozenie procesu w stopniu 2*. Opóźnienie działania interwencyjnego powoduje przesunięcie najbardziej prawdopodobnej straty plonu do wartości wysokich, stąd wskaźnik niezawodności procesu dla takiej strategii działania interwencyjnego jest niższy. Taka możliwość predykcyjnej analizy zagrożeń procesu jest użyteczna przy reaktywnym podejmowaniu decyzji odnośnie działań interwencyjnych.

Modelowanie niezawodności...

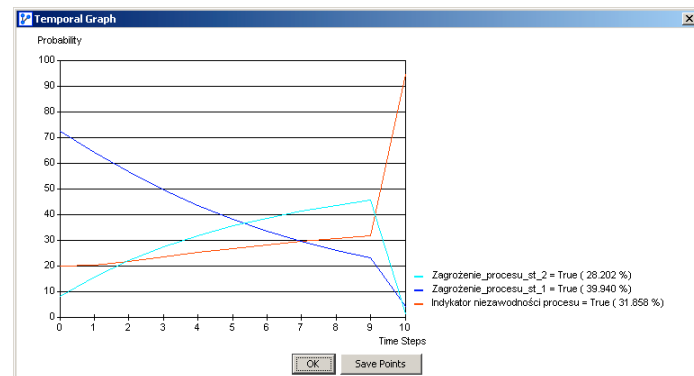
A



B



C



Rys. 3. Ewolucja zmian rozkładów prawdopodobieństwa na zbiorze wartości zmiennych reprezentujących stopnie zagrożenia i niezawodność procesu w przypadku wykonania działania interwencyjnego po 4 (A), 7 (B) i 9 (C) krokach czasowych

Fig. 3. Evolution of changes of probability distributions for a set of variables representing the degrees of risk and the reliability of the process in the case of carrying out an intervention action after 4 (A), 7 (B) and 9 (C) time steps

Powyższe stwierdzenia obowiązują przy wspomnianym już założeniu, że działania interwencyjne są adekwatne do stopnia zagrożenia procesu w chwili ich wykonywania. Celowe zatem byłoby uwzględnienie w modelu sytuacji gdy wymóg ten przy danym stopniu zagrożenia nie jest osiągalny.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono ogólną, uniwersalną konceptualizację adekwatną do metody modelowania procesów za pomocą sieci bayesowskich. Celem modelowania była w tym przypadku niezawodność procesu definiowana jako miara probabilistyczna na zbiorze wartości pewnego funkcjonału zwanego *Indykatorem niezawodności procesu* i interpretowanego jako nie wystąpienie potencjalnej straty plonu.

Przedstawiony model może też być użyteczny przy podejmowaniu decyzji odnośnie działań interwencyjnych w różnych fazach fenologicznych rolniczego procesu produkcyjnego.

Bibliografia

- Pearl J. 2000. Causality: Models, Reasoning and Inference. Cambridge Univ. Press. ISBN: 0521773628.
- Bayesia (on line). 2010. BayesiaLab – Bayesian network software. [Dostęp 30-07-2010]. Dostępny w Internecie: <http://www.bayesia.com>

MODELLING OF RELIABILITY OF COMPLEX BIOAGROTECHNICAL SYSTEMS

Abstract. The article deals with the method of modelling of reliability of complex bioagrotechnical systems. The concept of the model of process reliability based on the technology of Bayesian networks was presented. The reliability of the process was defined as a probabilistic measure on the set of values of a certain functional representing the potential yield and its possible decrease caused by biological threats and shaped partly by climate conditions and intervention actions. The evolution of changes of reliability of the process was mapped with the use of dynamic networks that take time location into account.

Key words: bioagrotechnical system, process reliability, dynamic Bayesian networks

Adres do korespondencji:

Andrzej Kusz; e-mail: andrzej.kusz@up.lublin.pl
Zakład Modelowania i Systemów Informacyjnych
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Doświadczalna 50 A
20-282 Lublin