

ZASTOSOWANIE HIERARCHICZNYCH PROCESÓW MARKOVA DO WYZNACZANIA OPTYMALNEJ STRATEGII UŻYTKOWANIA JAŁÓWEK HODOWLANYCH W STADZIE BYDŁA MIĘSNEGO

Anna Stygar, Joanna Makulska

Uniwersytet Rolniczy, Katedra Hodowli Bydła, Zespół Metod i Organizacji Hodowli Zwierząt Gospodarskich i Wolno Żyjących, Al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

Ekonomiczna efektywność stada bydła mięsnego w dużym stopniu uzależniona jest od wyboru strategii użytkowania jałówek remontowych. Strategia ta obejmuje decyzje dotyczące przebiegu odchowu i terminu zacielenia jałówki, określanego przez jej wiek i masę ciała oraz miesiąc kalendarzowy. Optymalną strategię użytkowania jałówek można wyznaczyć, wykorzystując metodę programowania dynamicznego z rozszerzeniem o tzw. wielopoziomowe hierarchiczne procesy Markova. Metoda ta znalazła szerokie zastosowanie we wspomaganie decyzji związanych z zarządzaniem stadami bydła i trzody chlewnej. W pracy przedstawiono wstępną wersję struktury dynamicznego modelu optymalizacji strategii użytkowania jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego. Model został opracowany przy wykorzystaniu programu komputerowego MLHMP (Multi-Level Hierarchic Markov Processes).

Właściwe zarządzanie stadem bydła mięsnego wymaga podejmowania optymalnych decyzji dotyczących odchowu i zacielenia jałówek remontowych. Termin zacielenia, określane przez wiek i masę ciała jałówki oraz miesiąc kalendarzowy, znacząco wpływa na uzyskiwaną efektywność produkcyjną i ekonomiczną (Funston i Deutscher, 2004). Uważa się, że jałówka w momencie krycia powinna posiadać masę ciała stanowiącą nie mniej niż 60-65% masy ciała dorosłych krów danej rasy, w określonym stadzie. Masa ciała jałówki, a potem również krowy, ma wyraźny wpływ na masę cielęcia przy urodzeniu i późniejszy jego wzrost. Jałówki i krowy o niższej masie ciała rodzą cielęta lżejsze, charakteryzujące się niższymi przyrostami dobowymi w porównaniu do cieląt pochodzących od jałówek i krów o wyższej masie ciała. Zbyt wczesne pokrycie jałówki powoduje zmniejszenie tempa rozwoju jej organizmu, natomiast pokrycie zbyt późne sprzyja otluszczeniu, co w obu przypadkach może prowadzić do trudności przy porodzie (Przysucha i in., 2002; Bennet i Gregory, 2001; Węglarz, 2008).

Według Dobickiego (1998), w klasycznym modelu chowu bydła mięsnego jałówki powinny być kierowane do krycia w wieku 15 miesięcy – ocielenia następują wtedy w wieku dwóch lat. W modelu alternatywnym pierwsze krycie jałówek ma miejsce

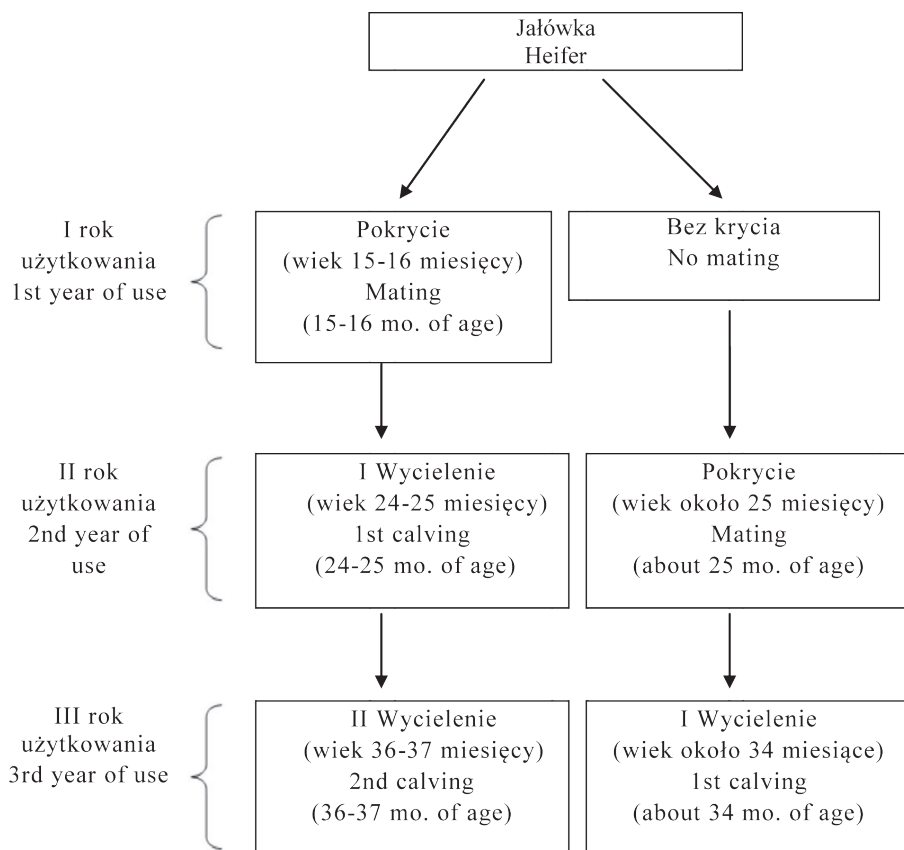
w wieku około 25 miesięcy, a wycielenie w wieku prawie trzech lat. Morrison i in. (1992), Petterson i in. (1992) oraz Bagley (1993) przytaczają wyniki badań, w których stwierdzono, że wydajność życiowa (mierzona produkcją żywca wołowego) krów cielących się po raz pierwszy w wieku dwóch lat jest większa, chociaż opóźnienie pierwszego wycielenia sprzyja uzyskiwaniu cięższych cieląt i lepszych wskaźników reprodukcji.

Aby wycielenie jałówki miało miejsce w wieku 23–24 miesięcy, pierwsza ruja powinna pojawić się w 12.–14. miesiącu życia. Wcześniejsze uzyskanie dojrzałości płciowej i odpowiedniej do krycia masy ciała, a tym samym obniżenie wieku pierwszego wycielenia, jest możliwe dzięki intensyfikacji żywienia odchowywanych jałówek. Intensywne żywienie powoduje skrócenie okresu odchowu, czemu towarzyszy obniżenie zapotrzebowania na paszę bytową w przeliczeniu na 1 kg przyrostu masy ciała oraz zmniejszenie kosztów stanowiska. W konsekwencji wpływa to na poprawę ogólnego wyniku ekonomicznego uzyskiwanego w stadzie bydła mięsnego (Bagley, 1993; Węglarz, 2008).

Polski klimat umożliwia utrzymywanie bydła mięsnego na pastwisku przez blisko pół roku (od początku maja do połowy października), co znacząco obniża koszty żywienia. W celu maksymalnego wykorzystania pastwiska przez odchowywane cielęta niezbędne jest wyznaczenie i przestrzeganie optymalnego sezonu wycieleń, a co za tym idzie, sezonu krycia. Uważa się, że sezonowość pokryć i wycieleń jest jednym z kluczowych czynników wpływających na opłacalność produkcji w stadach bydła mięsnego (Nova i in., 2002; Pilarczyk i Wójcik, 2007). Według Dobickiego (1998) sezony krycia i wycielenia w kolejnych latach nie powinny przekraczać okresu trzech miesięcy.

Reasumując – w zależności od podejmowanych przez hodowcę decyzji dotyczących intensywności żywienia jałówka może osiągnąć wymaganą do krycia masę ciała w różnym wieku. Mimo osiągnięcia przez nią wymaganej masy ciała hodowca może jednak odłożyć decyzję o pierwszym kryciu, chcąc zachować sezonowość wycieleń w stadzie lub kierując się przekonaniem, że krycie jałówek lepiej rozwiniętych, o wyższej masie ciała, sprzyja uzyskaniu korzystniejszych efektów produkcyjnych i reprodukcyjnych. Alternatywne rozwiązania w tym zakresie prezentuje rysunek 1.

Odchów i wprowadzanie do stada bydła mięsnego jałówek remontowych może być opisane jako wieloetapowy problem decyzyjny. Decyzje dotyczą intensywności żywienia jałówek oraz terminu ich krycia określanego przez wiek i miesiąc kalendarzowy. W prezentowanej pracy przedstawiono próbę rozwiązania tego problemu (tzn. wyznaczenia ciągu decyzji tworzących optymalną strategię użytkowania jałówek) przy wykorzystaniu metody modelowania i programowania dynamicznego (PD) z rozszerzeniem o tzw. wielopoziomowe hierarchiczne procesy Markova (MLHMP). Metoda MLHMP uznawana jest za jedną z najodpowiedniejszych do rozwiązywania wieloetapowych zadań decyzyjnych występujących często w hodowli i produkcji zwierzęcej. Do tej pory najczęściej zastosowań dotyczy wspomaganie decyzji w zarządzaniu stadami bydła i trzody chlewnej, co zaprezentowano w stosunkowo obszernym przeglądzie literatury poprzedzającym opis wstępnej wersji struktury przygotowywanego modelu optymalizacji strategii użytkowania jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego.



Rys.1. Alternatywne modele użytkowania jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego

Fig. 1. Alternative models of heifer management in a beef herd

Programowanie dynamiczne w konstruowaniu i rozwiązywaniu modeli optymalizacyjnych

Model jest uproszczoną reprezentacją systemu (fermy, przedsiębiorstwa, procesu produkcyjnego) służącą do wykrywania ilościowych relacji, jakie zachodzą między wartościami zmiennych występujących w badanym systemie i przewidywania efektów zmian wartości tych zmiennych (Jalvingh, 1992). Rozwiązanie modelu umożliwia wyznaczenie decyzji optymalnych. Na ogół w określonych warunkach produkcyjnych istnieje wiele decyzji, które mogą zostać podjęte. Są to tzw. decyzje dopuszczalne. Uznanie decyzji dopuszczalnej za optymalną wynika z przyjętego kryterium (minimalizacji nakładów, maksymalizacji efektywności, itd.). Poszukiwanie decyzji optymalnej, czyli optymalizacja, polega zatem na maksymalizacji lub minimalizacji tzw. funkcji celu określonej na zbiorze decyzji dopuszczalnych. Optymalizację realizuje się przy wykorzystaniu technik programowania matematycznego.

Szczególną rolę w rozwiązywaniu problemów decyzyjnych w hodowli i produkcji zwierzęcej odgrywa programowanie dynamiczne, uwzględniające czynnik czasu (Bellman, 1957; Bellman i Dreyfus, 1967; Wentcel, 1966). Stanowi ono dział matematyki, pozwalający realizować optymalne sterowanie wieloetapowych (sekwencyjnych) procesów poprzez wyznaczenie decyzji optymalnych na każdym etapie. Podział rozpatrywanego okresu czasu na etapy powoduje, że zamiast rozwiązywać jedno duże i zazwyczaj trudne zadanie optymalizacyjne dzieli się je na ciąg powiązanych ze sobą zadań mniejszych i łatwiejszych do rozwiązania. Wyniki uzyskane z rozwiązania zadań cząstkowych są poddawane syntezy w celu określenia optymalnego przebiegu procesu (Trzaskalik, 2003). Programowanie dynamiczne wykorzystuje się do optymalizacji procesów o ograniczonym lub nieograniczonym czasie trwania (tzw. horyzont planowania). W każdym etapie procesu określa się jego stan oraz podejmuje decyzję. Stan procesu opisywany jest poprzez zbiór parametrów zwanych zmiennymi stanu (np. masa ciała, wiek zwierzęcia). Zwykle zakłada się, że przestrzenie stanów i decyzji są zbiorami skończonymi. Decyzja optymalna dla wszystkich kombinacji zmiennych stanu wyznaczana jest poprzez maksymalizację (lub minimalizację) zdefiniowanej uprzednio funkcji celu. Wpływa ona w sposób deterministyczny lub stochastyczny na stan obserwowany w następnym etapie. W modelach deterministycznych stan w kolejnym etapie jest jednoznacznie określony. Natomiast w modelach stochastycznych jest on zmienną losową o znanym lub nieznanym rozkładzie. W takim przypadku należy oszacować prawdopodobieństwo zaistnienia określonego stanu w kolejnym etapie (tzw. prawdopodobieństwo przejścia do kolejnego stanu), uwzględniając stan i działanie podjęte w etapie bieżącym. Pochodną decyzji podjętej w danym etapie i stanie jest wynik produkcyjny lub ekonomiczny. Przypisanie każdej kombinacji etapu i stanu określonych decyzji dopuszczalnych nosi nazwę strategii (polityki). Wyznaczenie strategii optymalnej dla danego procesu polega na określeniu ciągu stanów i decyzji optymalizujących wartość zdefiniowanej funkcji celu (Kristensen, 1994).

Rozwiązując zadanie optymalizacyjne metodą programowania dynamicznego, w każdym etapie wybiera się sterowanie optymalne dla każdego z możliwych wyników poprzedniego etapu. Takie optymalne sterowanie, wybrane przy założeniu warunku, że w poprzednim etapie osiągnięto określony wynik, nazywa się warunkowym sterowaniem optymalnym. Warunkowe sterowanie optymalne w danym etapie należy wybrać tak, aby razem z wybranymi dla poprzednich etapów zapewniało maksymalną lub minimalną wartość przyjętego kryterium (Wentcel, 1966). W ten sposób realizowane jest optymalne działanie, które zgodnie z zasadą określoną przez Bellmana (1957) charakteryzuje się tym, że: „niezależnie od początkowego stanu i początkowej decyzji, pozostałe decyzje muszą być działaniami optymalnymi ze względu na stan wynikający z pierwszej decyzji”.

Zasadę optymalności sformułowaną przez Bellmana można przedstawić w postaci następującego równania funkcyjnego:

$$f_i(n) = \max_d [r_i^d(n) + \beta_{ij}^d(n) \sum_{j=1}^u p_{ij}^d(n) f_j(n+1)] \quad ; \quad i = 1, \dots, u \quad ; \quad n = 1,$$

gdzie:

n – etap,

$r_i^d(n)$ – efekt (produkcyjny lub ekonomiczny, np. zysk), który otrzymuje się w wyniku podjęcia przy stanie i decyzji d ,

$\beta_{ij}^d(n)$ – wskaźnik dyskontowania,

$p_{ij}^d(n)$ – prawdopodobieństwo przejścia ze stanu i do stanu j po podjęciu decyzji d .

Technika optymalizacji, czyli sposób wyboru optymalnego sterowania, zależy od tego, czy czas trwania procesu jest określony, czy nieokreślony. Przy określonym czasie trwania procesu (mała liczba etapów, ale duża liczba stanów) najczęściej stosowaną techniką jest tzw. iteracja wartości zysku, polegająca na maksymalizacji funkcji zysku. Dzięki tej technice możliwe jest uzyskiwanie rozwiązań nawet w przypadku bardzo złożonych modeli. Jest ona uważana za właściwe programowanie dynamiczne. Gdy liczba etapów jest duża (nieskończona), zakłada się często nieokreślony czas trwania procesu (nieograniczony horyzont planowania). Wtedy najczęściej stosowaną techniką optymalizacji jest tzw. iteracja działalności, znacznie różniąca się od iteracji wartości zysku. Iteracja działalności uznawana jest za bardziej skomplikowaną pod względem matematycznym i dlatego zaleca się korzystać z niej tylko w przypadku małej liczby stanów. Przy nieokreślonym czasie trwania procesu można też stosować iterację wartości zysku, lecz umożliwi ona tylko aproksymację działalności uznanej za optymalną.

Hierarchiczne procesy Markova (Hierarchic Markov Processes – HMP)

Konstruując modele dynamiczne uwzględniające większą liczbę zmiennych napotyka się na tzw. problem wielowymiarowości. Wynika on z faktu, iż zmienne mogą przyjmować wiele różnych wartości, a w związku z tym przestrzeń stanów (definiowana jako iloczyn liczby zmiennych i przyjmowanych przez nie wartości) staje się bardzo duża. W celu umożliwienia rozwiązania tego typu problemów A.R. Kristensen opracował teorię hierarchicznych procesów Markova (Kristensen, 1988; 1994; 1996). Za podstawę przyjął metodę zwaną procesami decyzyjnymi Markova lub programowaniem decyzyjnym Markova, stanowiącą połączenie idei programowania dynamicznego z matematyczną koncepcją łańcuchów Markova (Howard, 1960).

Hierarchiczne procesy Markova są serią procesów decyzyjnych, zwanych subprocesami, tworzących jeden proces główny. Zakłada się, że proces główny posiada nieskończoną liczbę etapów, ale skończoną liczbę stanów. Każdemu stanowi w procesie głównym odpowiada odrębny proces decyzyjny (subproces) o określonej długości czasu i skończonej liczbie stanów. Liczba subprocesów równa jest zatem liczbie stanów w procesie głównym, a długość etapu w procesie głównym równa się całkowitej długości odpowiadającego mu subprocesu. Hierarchiczne procesy Markova łączą ze sobą prostotę iteracji wartości zysku w subprocesach z efektywnością iteracji działalności w procesie głównym, a tym samym umożliwiają znalezienie optymalnych rozwiązań nawet dla modeli o bardzo dużych rozmiarach, ale tylko wtedy, gdy dużej liczbie stanów w subprocesach towarzyszy mała liczba stanów w procesie głównym (Kristensen, 1988, 1996). Metoda ta jest szczególnie przydatna do modelowania pro-

cesów decyzyjnych o nieokreślonym czasie trwania, w których kolejne etapy subprocesów wiążą się z wiekiem zwierzęcia (jak np. w odchowie jałówek). Można wtedy nie włączać do obliczeń wieku zwierzęcia jako oddzielnej zmiennej stanu, co pozwala znacznie zmniejszyć rozmiary modelu.

Zastosowanie hierarchicznych procesów Markova w zarządzaniu stadem

Teoria hierarchicznych procesów Markova znalazła szerokie zastosowanie we wspomaganie decyzji w hodowli i produkcji zwierzęcej. Przykłady jej użycia obejmują optymalizację decyzji dotyczących: terminu inseminacji, organizacji cyklu reprodukcyjnego, użytkowania jałówek oraz problemu rotacji („zastępowania” krów jałówkami) w stadzie bydła mlecznego (Kristensen 1987, 1989; Houben i in., 1994; Mourits i in., 1999; 2000), opasu buhajków (Makulska i Kristensen, 1999) oraz rotacji loch w stadach trzody chlewnej (Huirne i in., 1988, 1993; Versteegen i in., 1998; Pla i in., 2003).

Problem rotacji, czyli zastępowania użytkowanego zwierzęcia kolejnym osobnikiem jest jednym z najistotniejszych problemów decyzyjnych w zarządzaniu stadem. Jego rozwiązanie polega na określeniu warunków (wiek, produkcyjność, itd.), w których zastąpienie można uznać za działanie optymalne z punktu widzenia przyjętego kryterium (Kristensen, 2003). Pierwszym przykładem wykorzystania teorii hierarchicznych procesów Markova do rozwiązania problemu zastępowania krów jałówkami w stadzie bydła mlecznego był model opracowany przez Kristensena w roku 1987. W modelu tym krowa charakteryzowana była poprzez: klasę genetyczną określoną na podstawie wartości hodowlanej ojca, numer laktacji, etap laktacji, wydajność mleka w poprzedniej i bieżącej laktacji oraz długość okresu międzywycieleniowego. Jako kryterium optymalizacji przyjęto maksymalizację wartości zysku przy nieskończonym horyzoncie planowania. Uzyskane rozwiązania pozwalają uszeregować krowy w stadzie według spodziewanego zysku z dalszego ich użytkowania oraz określić optymalny moment zastąpienia jałówkami. Gdyby model sformułowano, stosując metodę tradycyjnych procesów decyzyjnych Markova, przestrzeń stanów osiągnęłaby rozmiary uniemożliwiające jego rozwiązanie (około 60 000 stanów). Natomiast użycie metody HMP i zmiana struktury modelu na hierarchiczną pozwoliły w stosunkowo prosty sposób wyznaczyć strategię optymalną. W roku 1989 Kristensen przedstawił kolejną wersję modelu rotacji w stadzie krów mlecznych, w której uwzględnił czynnik ograniczający produkcję, jakim są kwoty mleczne (Kristensen, 1989). Spowodowało to zwiększenie liczby stanów do 180 080, a zatem model był nierozwiązywalny metodami tradycyjnymi. Aby uzyskać rozwiązanie, podobnie jak poprzednio, zastosowano metodę hierarchicznych procesów Markova.

Ważnym przykładem wykorzystania metody HMP do wspomaganie ekonomicznie optymalnych decyzji dotyczących terminu inseminacji i rotacji krów w stadach charakteryzujących się wysoką częstotliwością występowania *mastitis* jest model opracowany w 1994 roku przez Houbena i in. W modelu tym jako zmienne stanu uwzględniono szczegółowe informacje na temat występowania u krowy klinicznych objawów *mastitis*. Oprócz tego w każdym etapie, odpowiadającym kombinacji kolejnej laktacji i długości okresu międzywycieleniowego, stan krowy opisywany był poprzez jej produkcyjność w poprzedniej i bieżącej laktacji oraz długość okresu mię-

dzywycieleniowego. Ze względu na znaczną liczbę klas w obrębie każdej zmiennej stanu liczba różnych stanów, w których krowa mogła się znaleźć w czasie swojego życia wyniosła 6 821 724. Czas potrzebny do uzyskania optymalnych rozwiązań uznano za możliwy do zaakceptowania, jednakże istotnie ograniczający dalszą rozbudowę struktury modelu.

Metoda HMP została też wykorzystana do ekonomicznej optymalizacji decyzji dotyczących odchowu i wprowadzania do stada bydła mlecznego jałówek remontowych. W opracowanym przez Mourits i in. (1999) modelu odchów jałówki traktowany jest jako wyodrębniona działalność na fermie bydła mlecznego, rozpoczynająca się w chwili urodzenia cielęcia i zakończona sprzedażą odchowanej jałówki. Stan jałówki remontowej opisywany jest poprzez wiek, sezon urodzenia, masę ciała, dobowe przyrosty masy ciała w okresie do uzyskania dojrzałości płciowej oraz status reprodukcyjny (zacielona/niezacielona). Optymalizowane są decyzje dotyczące intensywności żywienia jałówki, terminu inseminacji i zastąpienia, rozumianego jako wprowadzenie do stada jałówek kolejnej osobniczki w miejsce wybrakowanej jałówki niezacielonej lub sprzedanej jałówki zacielonej. Parametry wejściowe do modelu oszacowano na podstawie informacji z ferm holenderskich. Model został następnie zaadaptowany do warunków odchowu jałówek na fermach amerykańskich (Mourits i in., 2000).

Kolejne zastosowanie metody HMP do optymalizacji produkcji zwierzęcej zostało opisane w pracy Makulskiej i Kristensena (1999). Autorzy ci przedstawili teoretyczne założenia modelu umożliwiającego wspomaganie decyzji dotyczących przebiegu indywidualnego i grupowego opasu buhajków różnych ras, przy założeniu zróżnicowanych warunków techniczno-ekonomicznych. W opisie indywidualnym stan buhajka opisywany był przez miesiąc jego urodzenia i aktualną masę ciała, a decyzje dotyczyły intensywności żywienia oraz skierowania do rzeźni lub dalszego opasu. W opisie grupowym zmiennymi stanu były średnia masa ciała buhajka w obrębie grupy i liczba buhajków aktualnie pozostających w boksie. Decyzje, podobnie jak w opisie indywidualnym, dotyczyły intensywności żywienia oraz skierowania do rzeźni lub dalszego opasu, ale podejmowane były dwuetapowo – w pierwszym etapie podejmowano decyzje o uboju pojedynczych zwierząt, w drugim – decyzje o uboju pozostałych buhajków, tak aby opróżnić boks i wprowadzić do niego nową grupę. Zależnie od rodzaju opasu (indywidualny, grupowy) jako kryterium optymalizacji przyjęto maksymalizację nadwyżki bezpośredniej w przeliczeniu na buhajka lub grupę buhajków.

Ponieważ problemy reprodukcji i zastępowania w stadzie bydła są zasadniczo podobne do występujących w stadzie trzody chlewnej modele zarządzania stadem bydła były modyfikowane zgodnie z potrzebami hodowców trzody. Jednakże modele opisujące dynamikę zmian w stadzie trzody chlewnej są mniej liczne, prawdopodobnie z powodu trudności w obrazowaniu przebiegających szybciej oraz wykazujących większą zmienność cykli produkcyjnych i reprodukcyjnych u tego gatunku zwierząt (Pla i in., 2003). Pierwszym opisanym przykładem wykorzystania metody hierarchicznych procesów Markova do wspomaganie decyzji dotyczących wyznaczenia ekonomicznie optymalnego terminu rotacji w stadzie loch był model skonstruowany przez zespół Huirne'a w 1988 roku. Ostateczna forma tego modelu została zaprezentowana w roku 1993 (Huirne i in., 1993). Za kryterium optymalizacji przyjęto aktualną wartość oczekiwanych zysków rocznych, przy założeniu określonego horyzontu

planowania. Ze względu na dużą liczbę stanów i możliwych decyzji model w pierwszej wersji posiadał bardzo duże rozmiary. Wprowadzenie struktury hierarchicznej pozwoliło zmniejszyć przestrzeń stanów i decyzji, co ułatwiło rozwiązanie. W analizie czułości modelu badano możliwości dalszej redukcji jego rozmiarów poprzez zestawienie jakości uzyskiwanych rozwiązań z czasem potrzebnym do ich wyznaczenia, przy użyciu standardowego komputera osobistego.

Praktyczne zastosowanie hierarchicznych procesów Markova do wyznaczenia optymalnej strategii zastępowania w stadzie trzody chlewnej zostało również zaprezentowane w obejmującym miliony stanów modelu Verstegen i in. (1998). Badacze ci ocenili opłacalność stosowania informatycznych systemów zarządzania w chowie trzody chlewnej poprzez porównanie efektów ekonomicznych uzyskiwanych przez farmerów wykorzystujących informacje na temat wyznaczonej optymalnej strategii z efektami tych, którzy takich informacji nie posiadali. Zbadano także, czy teoretyczne oszacowania efektów ekonomicznych, otrzymane przy użyciu metody modelowania matematycznego, znajdują potwierdzenie w rzeczywistych wynikach uzyskiwanych przez farmerów.

Jednym z ostatnich zastosowań metody HMP do rozwiązywania problemu rotacji w stadzie trzody chlewnej jest model symulacyjny przedstawiający cykl życiowy loch (Pla i in., 2003). Model ten ma ułatwić ocenę ekonomicznych efektów różnych decyzji dotyczących reprodukcji i zastępowania użytkowanych loch kolejnymi osobniczkami. Przy jego konstruowaniu wykorzystano rzeczywiste informacje produkcyjne, reprodukcyjne i ekonomiczne z kilku ferm. Ocenę zgodności uzyskanych rozwiązań modelowych z danymi empirycznymi wykonano przy wykorzystaniu testu χ^2 , niestosowanego dotychczas w walidacji modeli. Stwierdzono, że zaproponowany model precyzyjnie opisuje funkcjonowanie stada znajdującego się w równowadze. Zaproponowano jednak, że w przyszłości należałoby wprowadzić do niego procedury optymalizacyjne.

Wielopoziomowe hierarchiczne procesy Markova (Multi-Level Hierarchic Markov Processes – MLHMP) w zarządzaniu stadem

Zastosowanie teorii HMP stanowiło istotne ułatwienie w rozwiązywaniu modeli o stosunkowo dużych rozmiarach. Jednak dopiero dzięki opracowanej przez Kristensena i Jørgensena (2000) metodzie wielopoziomowych hierarchicznych procesów decyzyjnych Markova (MLHMP) można rozwiązywać modele posiadające olbrzymią przestrzeń stanów i decyzji. Użycie metody MLHMP pozwala rozszerzyć strukturę hierarchiczną modelu (proces główny, subprocessy) o kolejne poziomy. Horyzonty planowania na poszczególnych poziomach (subprocesach) mogą być różne. W konsekwencji stwarza to możliwość konstruowania i rozwiązywania nawet bardzo złożonych modeli zarządzania stadem.

Wielopoziomowe hierarchiczne procesy Markova są szczególnie cennym narzędziem do wyznaczania optymalnej długości użytkowania i momentu zastąpienia zwierzęcia w stadzie kolejnym osobnikiem (Kristensen, 2003 a). Przykładem zastosowania tej metody do rozwiązywania wyżej opisanego problemu jest model optymalizacji długości opasu i ubojowej masy ciała walców skonstruowany przez Nielsen i Kristensena (2002). Kolejne wersje i aplikacje tego modelu opisane zostały w pra-

cach Nielsen i in. (2004) oraz Nielsen i Kristensena (2007). Model posiada strukturę 4-poziomowego hierarchicznego procesu Markova, w którym decyzje zdefiniowane są na trzech poziomach. Dotyczą one rodzaju wykorzystywanych pastwisk, intensywności żywienia zimowego, momentu rozpoczęcia końcowej fazy opasu oraz terminu uboju.

Wzrost wielkości stad trzody chlewnej i rozwój przemysłowych metod tuczu spowodował potrzebę stworzenia komputerowych narzędzi wspomagających zarządzanie produkcją wieprzowiny. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie był model opracowany w roku 2003 przez Kristensena, optymalizujący decyzje wyboru tuczników przeznaczonych na ubój z danego boksu (Kristensen, 2003 b). Podstawowymi danymi wejściowymi do modelu były oszacowania aktualnej masy ciała zwierząt. Przy konstruowaniu i rozwiązywaniu modelu zastosowano alternatywnie 2- lub 3-poziomowy hierarchiczny proces Markova.

Metoda 3-poziomowego hierarchicznego procesu Markova, w którym decyzje zdefiniowano na dwóch poziomach została też wykorzystana w modelu rotacji loch zaprezentowanym przez Kristensena i Søllesteda w 2004 roku (Kristensen i Søllested 2004 a, 2004 b). W modelu biologicznym, który stał się podstawą do opracowania modelu optymalizacyjnego, opisano specyficzne dla badanego stada parametry użytkowości i pobranie paszy przez lochy.

Z kolei Toft i in. (2005) skonstruowali model optymalizacji strategii postępowania w sytuacji wystąpienia w stadzie trzody chlewnej choroby zakaźnej. Optymalizowane decyzje dotyczyły kierowania na ubój tuczników z objawami choroby oraz zastosowania działań kontrolnych w zakresie rozprzestrzeniania się choroby. Działania te obejmowały szczepienia i leczenie chorych zwierząt. Podjęto próbę równoczesnej optymalizacji opisanych decyzji i badano interakcję pomiędzy nimi. Głównymi komponentami opracowanego systemu wspomagania decyzji były stochastyczny model wzrostu, modele rozprzestrzeniania się choroby w obrębie kojca oraz pomiędzy kojcami, a także powiązanie pomiędzy modelem wzrostu a modelem rozprzestrzeniania się choroby.

Z teoretycznego punktu widzenia wielopoziomowe hierarchiczne procesy Markova są najlepszą metodą rozwiązywania sekwencyjnych problemów decyzyjnych, co potwierdzają liczne zastosowania opisane w literaturze. Jednakże brak standardowego oprogramowania komputerowego przez wiele lat stanowił największą przeszkodę w upowszechnianiu tej metody w praktyce. Dopiero skonstruowanie w roku 2000 przez A.R. Kristensena programu komputerowego MLHMP (Multi-Level Hierarchic Markov Processes) pozwoliło szerzej wykorzystać wielopoziomowe hierarchiczne procesy Markova do optymalizacji decyzji w hodowli i produkcji zwierzęcej. Program został zapisany w obiektowym języku programowania Java, a użytkownik może go pobrać ze strony internetowej¹. W oknie edycji model przedstawiony jest w postaci „drzewa”, którego „pień” odzwierciedla proces główny i subprocesy. Odchodzące od „pnia” „konary” to etapy procesu, a „gałęzie” na „konarach” to kolejne jego stany. Do każdego stanu przypisane są określone działania (akcje, decyzje). Działania mogą prowadzić do zainicjowania kolejnego subprocesu lub mogą stanowić końcowe od-

¹ <http://www.prodstyr.ihh.kvl.dk/software/mlhmp.html>

gałęzienie, co oznacza, że oszacowano następujące parametry: wynik w jednostkach pieniężnych lub/i wynik w jednostkach produktu oraz prawdopodobieństwo przejścia do określonego stanu w kolejnym etapie.

W przypadku bardziej złożonych zagadnień decyzyjnych niezbędne jest użycie narzędzia systemowego określanego jako „plug-in”. Plug-in jest zapisanym w języku Java modulem rozszerzającym możliwości istniejącego programu, konstruowanym w celu rozwiązania konkretnego problemu decyzyjnego. Po zdefiniowaniu w module plug-in struktury i parametrów wejściowych model optymalizacyjny jest tworzony automatycznie i od tej chwili możliwe jest pełne wykorzystanie funkcjonalności programu MLHMP. Gdy plug-in zostanie aktywowany z platformy MLHMP, użytkownik może wprowadzić parametry dotyczące określonego stada, które są następnie zapisywane do pliku i wczytane przy kolejnym uruchomieniu programu. Skonstruowany model jest aktywowany poprzez wybór określonego plug-inu. Program MLHMP umożliwia optymalizację przy użyciu kilku algorytmów obliczeniowych i założeniu różnych kryteriów optymalizacji. Wykorzystanie metody symulacyjnych łańcuchów Markova pozwala obliczyć oczekiwaną wartość podstawowych wskaźników techniczno-ekonomicznych, w procesie przebiegającym według wyznaczonej strategii optymalnej (Kristensen, 2003 a).

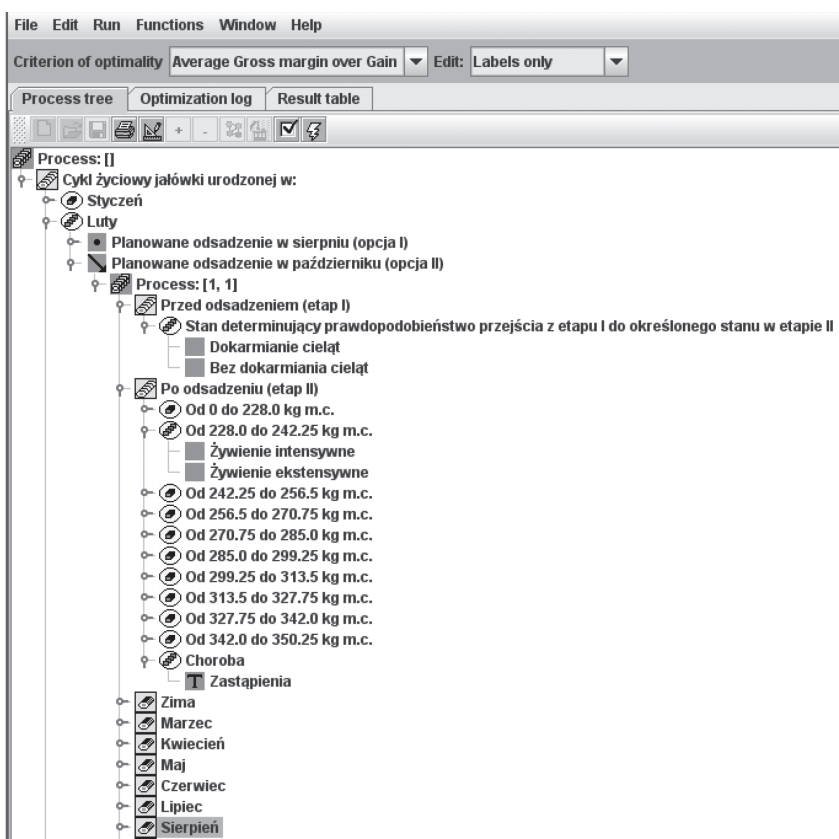
Wielopoziomowe hierarchiczne procesy Markova w optymalizacji strategii użytkownika jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego

Metoda wielopoziomowych hierarchicznych procesów Markova może być też użyta do wspomagania decyzji dotyczących optymalnego przebiegu odchowu i wprowadzenia do stada bydła mięsnego jałówek remontowych. W prezentowanej pracy przedstawiono założenia i wstępną wersję struktury modelu, umożliwiające wspomaganie ww. procesów decyzyjnych. Optymalizowane będą decyzje dotyczące terminów krycia (rok użytkowania jałówki – drugi lub trzeci oraz miesiąc kalendarzowy), metody krycia (inseminacja z synchronizacją rui, krycie haremowe) oraz intensywności żywienia odchowywanych jałówek (intensywne, ekstensywne). Jako kryterium optymalizacji przyjęto maksymalizację efektywności ekonomicznej użytkownika jałówki. Założono, że użytkowanie obejmuje odchów jałówki, jej zacielenie, ciężę, wycielenie oraz odchów cielęcia. Wartości parametrów modelu określane są na podstawie danych empirycznych i informacji zaczerpniętych z literatury.

Opisany problem badawczy jest realizowany poprzez:

- sformułowanie zadań decyzyjnych i skonstruowanie matematycznego modelu optymalizacji strategii użytkownika jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego (strukturę i parametry modelu optymalizacyjnego zdefiniowano w module „plug-in” programu komputerowego MLHMP),
- rozwiązanie modelu – wyznaczenie rozwiązań optymalnych,
- ocenę poprawności uzyskanych rozwiązań – weryfikację modelu,
- wyznaczenie optymalnych strategii użytkownika jałówek przy różnych założeniach produkcyjno-ekonomicznych (analizy czułości modeli),
- oszacowanie efektywności produkcyjnej i ekonomicznej wyznaczonych strategii.

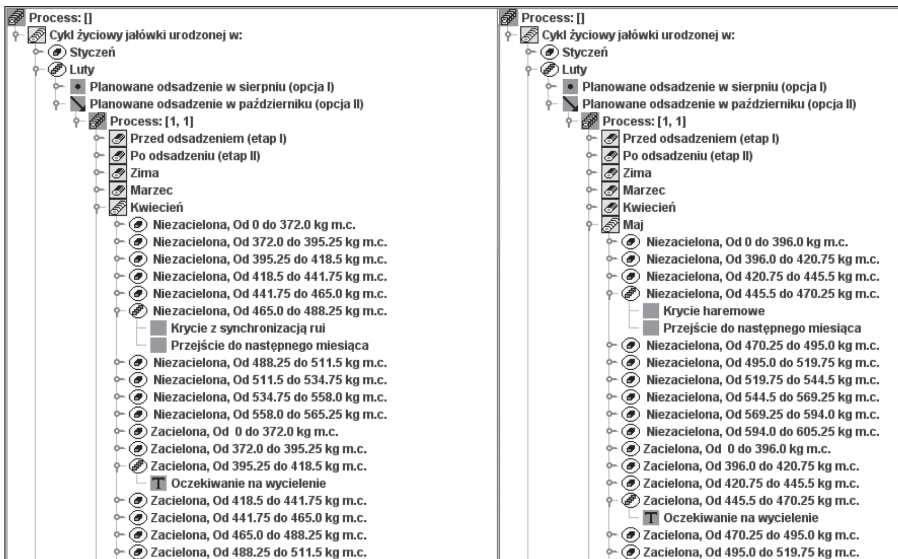
Na rysunku 2 zaprezentowano fragment wstępnej struktury modelu optymalizacji strategii użytkowania jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego opracowanego przy wykorzystaniu programu MLHMP. Proces główny (oznaczony jako „Process: ()”) uwzględnia miesiąc urodzenia jałówki i możliwe terminy planowanego odsadzenia. Subproces (oznaczony jako „Process: (1,1)”) – przy założeniach: urodzenie jałówki w lutym, planowane odsadzenie w październiku) został podzielony na kolejne etapy życia jałówki („Przed odsadzeniem”, „Po odsadzeniu”, „Zima”, „Marzec”, „Kwiecień”, itd.). W etapach subprocessu: „Przed odsadzeniem”, „Po odsadzeniu”, „Zima” podejmowane są decyzje dotyczące poziomu żywienia odchowywanych jałówek, a począwszy od etapu „Marzec” dodatkowo decyzje o zacieleniu i jego sposobie (inseminacja z synchronizacją rui w okresie alkierzowym, krycie haremowe na pastwisku).



Rys. 2. Fragment wstępnej struktury modelu optymalizacji strategii użytkowania jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego – opracowanego przy wykorzystaniu komputerowego programu MLHMP

Fig. 2. Part of initial structure of the model for heifer management optimization strategy in a beef herd – developed using MLHMP software

Na rysunku 3 przedstawiono fragmenty struktury subprocessu oznaczonego jako „Process: (1,1)” – przy założeniach: urodzenie jałówki w lutym, planowane odsadzenie w październiku. W lewym oknie zaprezentowano etap oznaczony jako „Kwiecień” wraz z możliwymi stanami jałówki (masa ciała, zacielona/niezacielona) oraz decyzjami o jej zacieleniu (inseminacja z synchronizacją rui) lub przejściu do następnego etapu (miesiąca). W przypadku wystąpienia stanu „jałówka zacielona” jedyną decyzją jest „oczekiwanie na wycielenie”. Jest to decyzja umożliwiająca zakończenie bieżącego procesu. W prawym oknie przedstawiono etap subprocessu oznaczony jako „Maj” wraz z możliwymi stanami jałówki (masa ciała, zacielona/niezacielona) oraz decyzjami o jej zacieleniu (krycie haremowe) lub przejściu do następnego etapu (miesiąca). Podobnie jak w oknie lewym w przypadku wystąpienia stanu „jałówka zacielona” jedyną decyzją jest „oczekiwanie na wycielenie”.



Rys. 3. Fragmenty struktury subprocessu oznaczonego jako „Process: (1,1)” w modelu optymalizacji strategii użytkowania jałówek hodowlanych w stadzie bydła mięsnego, opracowanego przy wykorzystaniu komputerowego programu MLHMP

Fig. 3. Parts of structure of “Process: (1,1)” subprocess in the model for heifer management optimization strategy in a beef herd, developed using MLHMP software

Dzięki opracowaniu matematycznego modelu odchowu i wprowadzania do stada bydła mięsnego jałówek remontowych możliwe będzie uzyskanie lepszego wglądu w przebieg i ekonomiczne efekty tego procesu. Ułatwi to podejmowanie optymalnych decyzji w zarządzaniu stadem jałówek, co w konsekwencji przyczyni się do poprawy ogólnej opłacalności produkcji żywca wołowego.

Piśmiennictwo

- Bagley C.P. (1993). Nutritional management of replacement beef heifers: a review. *J. Anim. Sci.*, 71: 3155–3163.
- Bellman R.E. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton: Princeton University Press.
- Bellman R.E., Dreyfus S.E. (1967). *Programowanie dynamiczne – zastosowanie*. PWE, Warszawa.
- Bennett G.I., Gregory K.E. (2001). Genetic (co)variances for calving difficulty score in composite and parental populations of beef cattle: I. Calving difficulty score, birth weight, weaning weight, and postweaning gain. *J. Anim. Sci.*, 79: 45–51.
- Dobicki A. (1998). Hodowla bydła mięsnego w Sudetach. Wydawnictwo Wojewódzkiego Ośrodka Doradztwa Rolniczego w Jeleniej Górze, ss. 109–151.
- Funston R.N., Deutscher G.H. (2004). Comparison of target breeding weight and breeding date for replacement beef heifers and effects on subsequent reproduction and calf performance. *J. Anim. Sci.*, 82: 3094–3099.
- Houben E.H.P., Huirne R.B.M., Dijkhuizen A.A., Kristensen A.R. (1994). Optimal replacement of mastitis cows determined by a hierarchic Markov process. *J. Dairy Sci.*, 77: 2975–2993.
- Howard R. (1960). *Dynamic Programming and Markov Processes*. The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts.
- Huirne R.B.M., Dijkhuizen A.A., van Beek P., Hendriks Th.H.B. (1993). Stochastic dynamic programming to support sow replacement decisions. *Europ. J. Operat. Res.*, 67: 161–171.
- Huirne R.B.M., Hendriks Th.H.B., Dijkhuizen A.A., Giesen G.W.J. (1988). The economic optimization of sow replacement decisions by stochastic dynamic programming. *J. Agricult. Econ.*, 39: 426–438.
- Jalvingh A.W. (1992). The possible role of existing models in on-farm decision support in dairy cattle and swine production. *Livest. Prod. Sci.*, 31: 351–365.
- Kristensen A.R. (1987). Optimal replacement and ranking of dairy cows determined by a hierarchic Markov process. *Livest. Prod. Sci.*, 16: 131–144.
- Kristensen A.R. (1988). Hierarchic Markov processes and their applications in replacement models. *Europ. J. Operat. Res.*, 35: 207–215.
- Kristensen A.R. (1989). Optimal replacement and ranking of dairy cows under milk quotas. *Acta Agricult. Scand.*, 39: 311–318.
- Kristensen A.R. (1994). A survey of Markov decision programming techniques applied to the animal replacement problem. *Europ. Rev. Agricult. Econ.*, 21: 73–93.
- Kristensen A.R. (1996). Textbook notes of herd management: Dynamic programming and Markov decision processes. *Dina Notat*, 49.
- Kristensen A.R. (2000). *Software Users' Guide: Multi-level hierarchic Markov processes*. *Dina Notat*, 84, Second Edition, September 2000.
- Kristensen A.R. (2003 a). A general software system for Markov decision processes in herd management applications. *Comp. Electron. Agricult.*, 38: 199–215.
- Kristensen A.R. (2003 b). Optimal slaughter pig marketing with emphasis on information from on-line live weight assessment. EFITA 2003. Fourth European Conference of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment, 5-9.07.2003 Debrecen, Hungary.
- Kristensen A.R., Jørgensen E. (2000). Multi-level hierarchic Markov processes as a framework for herd management support. *Ann. Operat. Res.*, 94: 69–89.
- Kristensen A.R., Søllested T.A. (2004 a). A sow replacement model using Bayesian updating in a three-level hierarchic Markov process I. Biological model. *Livest. Prod. Sci.*, 87: 13–24.
- Kristensen A.R., Søllested T.A. (2004 b). A sow replacement model using Bayesian updating in a three-level hierarchic Markov process II. Optimization model. *Livest. Prod. Sci.*, 87: 25–36.
- Makulska J., Kristensen A.R. (1999). Economic optimization of bull fattening. In: *Perspectives of Modern Information and Communication Systems in Agriculture, Food Production and Environmental Control*, European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment, Bonn, Germany, pp. 443–449.
- Morrison D.G., Feazel J.I., Bagley C.P., Blouin D.C. (1992). Postweaning growth and reproduction of beef heifers exposed to calve at 24 or 30 months of age in spring and fall seasons. *J. Anim. Sci.*, 70: 622–630.

- Mourits M.C.M., Galligan D.T., Dijkhuizen A.A., Huirne R.B.M. (2000). Optimization of Dairy Heifer Management Decisions Based on Production Conditions of Pennsylvania. *J. Dairy Sci.*, 83: 1989–1997.
- Mourits M.C.M., Huirne R.B.M., Dijkhuizen A.A., Kristensen A.R., Galligan D.T. (1999). Economic optimization of dairy heifer management decisions. *Agricult. Syst.*, 61: 17–31.
- Nielsen B.K., Kristensen A.R. (2002). A model for simultaneous optimization of feeding level and slaughtering policy of organic steers. In: *First European Workshop on Sequential Decisions under Uncertainty in Agriculture and Natural Resources*. INRA, Toulouse, France.
- Nielsen B.K., Kristensen A.R., Thamsborg S.M. (2004). Optimal decisions in organic steer production – a model including winter feed level, grazing strategy and slaughtering policy. *Livest. Prod. Sci.*, 88: 239–250.
- Nielsen B.K., Kristensen A.R. (2007). Optimal decisions in organic beef production from steers – Effects of criterion of optimality and price changes. *Livest. Sci.*, 110: 25–32.
- Nova V., Jezkova A., Stadnik L. (2002). Wskaźniki ekonomicznej hodowli bydła ras mięsnych. *Biul. Inf. IZ*, 2: 259–269.
- Petterson D.J., Perry R.C., Kiracofe G.H., Bellows R.A., Staigmiller R.B., Corah L.R. (1992). Management considerations in heifer development and puberty. *J. Anim. Sci.*, 70: 4018–4035.
- Pilarczyk R., Wójcik J. (2007). Comparison of calf rearing result and nursing cow performance in various beef breeds managed under the same condition in north-western Poland. *Czech J. Anim. Sci.*, 52: 325–333.
- Pla L.M., Pomar C., Pomar J. (2003). A Markov decision sow model representing the productive lifespan of herd sows. *Agricult. Syst.*, 76: 253–272.
- Przysucha T., Czarniecki vel Sarnacki M., Grodzki H., Zdziarski K. (2002). The influence of factors on body weight and daily gains of Angus calves. *Rocz. Nauk. Zoot.*, 15: 225–230.
- Toft N., Kristensen A.R., Jørgensen E. (2005). A framework for decision support related to infectious diseases in slaughter pig fattening units. *Agricult. Syst.*, 85: 120–137.
- Trzaskalik T. (2003). Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem. PWE, Warszawa.
- Verstegen J.A., Sonnemans J., Huirne R.B., Dijkhuizen A.A., Cox J.C. (1998). Quantifying the effects of sow-herd management information systems on farmers' decision making using experimental economics. *American J. Agricult. Econom.*, 80: 821–829.
- Wentcel E. (1966). Elementy programowania dynamicznego. PWE, Warszawa.
- Węglarz A. (2008). Pierwsze zacielenie terminem strategicznym. *Top Agrar, Bydło*, 10: 24–29.

Zatwierdzono do druku 23 VI 2009

ANNA STYGAR, JOANNA MAKULSKA

Application of hierarchic Markov processes in determining the optimal strategy of heifer management in beef herd

SUMMARY

The economic efficiency of a beef herd depends to a considerable degree on heifer management decisions. Following a literature review of the application of hierarchic Markov processes in herd management, a description of the general framework of the model for economic optimization of the decisions on heifer rearing and mating is presented. The model has been developed using dynamic programming (DP) method with the multi-level hierarchic Markov processes. In constructing and editing of the model as well as in finding the optimal strategy of heifer management the Multi-Level Hierarchic Markov Processes (MLHMP) software system was applied.

Key words: dynamic programming (DP), hierarchic Markov processes, heifer, beef herd