

УДК 658.52.012.011.56:631.22.014

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ МОЛОКА В ВЫМЕНИ КОРОВЫ

А.Г. Сеньков

Белорусский государственный аграрный технический университет
Республика Беларусь, 220013, Минск, проспект Независимости, 99
E-mail: sencov_1981@tut.by

И. И. Гируцкий

Белорусский государственный аграрный технический университет
Республика Беларусь, 220013, Минск, проспект Независимости, 99
E-mail: gir_50@mail.ru

Ключевые слова: моделирование, интеллектуальное управление, КРС.

Аннотация: На основании статистической обработки массивов экспериментальных данных по текущим надоям молока с учетом промежутка времени между доениями, полученными в условиях действующих молочно-товарных комплексов, предложена динамическая математическая модель прогноза накопления молока в вымени коровы. Коэффициент детерминации, при использовании в качестве модели аperiodического звена 2-го порядка, составил 0,82. Результаты исследований применимы при диагностике состояния коровы, при сравнительной оценке эффективности кратности доения и т.д.

1. Введение

В информационном обеспечении молочного скотоводства развиты и широко применяются разнообразные модели лактационных кривых [1]. Как правило, такие модели связывают прогноз суточного надоя с периодом лактации. Анализ литературы и реальных экспериментальных данных показывает, наряду с другими факторами, влияние на текущий надой промежутка времени между доениями и кратности доения [3, 4]. Так, зоотехническими исследованиями установлено [5], что скорость секреции молока в вымени коровы неравномерна по времени: интенсивная секреция молока у коров наблюдается в течение 4 часов после очередного доения, а затем она уменьшается и постепенно прекращается через 10 часов. При этом исследование влияния промежутка времени между доениями на объем накопленного молока традиционно выполнялось методом активного эксперимента [3-5]: осуществлялись дойки коровы через разные промежутки времени и измерялось количество полученного молока. Однако проведение подобного активного эксперимента с биологическим объектом, каким является корова, имеет существенный недостаток, связанный с нарушением физиологического ритма животного, что может служить источником погрешности измерений. В то же время в Республике Беларусь функционируют большое число молочно-товарных комплексов с компьютеризированными системами управления. В системах управления стадом накапливаются значительные объемы данных по разовым надоям с различными промежутками времени между доениями, обусловленными принятыми условиями со-

держания дойного стада (рис. 1). Таким образом, возникает возможность путем обработки больших массивов данных (для 1 коровы, при 305 днях лактации и трехразовом доении – 915 измерений; стадо – 200, 400 или 600 коров) в рамках пассивного эксперимента построить динамическую модель накопления молока в вымени коровы.

01 Выборка из VisitIntervals						
CowNo	DayNo	MK	Yield	HoursSinceLastVisit	SincePriorMi	
2	1	1	9,57			<input type="checkbox"/>
2	1	2	1,265	7,14527777780313		<input checked="" type="checkbox"/>
2	2	1	1,578	16,5122222222853		<input type="checkbox"/>
2	2	2	3,593	6,358333333345363		<input checked="" type="checkbox"/>
2	3	1	8,815	17,81861111111427		<input type="checkbox"/>
2	3	2	3,571	5,98833333322546		<input checked="" type="checkbox"/>
2	3	3	3,992	5,80083333322546		<input checked="" type="checkbox"/>
2	4	1	6,359	11,5016666666488		<input checked="" type="checkbox"/>
2	4	2	4,437	6,93305555556435		<input checked="" type="checkbox"/>
2	4	3	2,269	4,4544444444729		<input checked="" type="checkbox"/>
2	5	1	9,218	12,6197222221526		<input checked="" type="checkbox"/>
2	5	2	4,097	6,367222221503		<input checked="" type="checkbox"/>
2	5	3	2.483	5.24861111113569		<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 1. Фрагмент первичных данных по доению коровы №2 из СУС «Майстар» [6]: CowNo – идентификационный номер коровы; DayNo – текущий день лактации; МК – номер доения (1- утреннее, 2 – обеденное, 3 – вечернее); Yield – величина текущего надоя, кг; HoursSinceLastVisit – промежуток времени от предыдущего доения.

В данной работе предложены динамические математические модели, описывающие динамику секреции молока в вымени в зависимости от времени, прошедшего с момента последнего доения. На основе статистического анализа экспериментальных данных по надоям коров выполнена оценка точности предложенных моделей.

2. Основная часть

Теоретическое математическое описание процессов жизнедеятельности, происходящих в живых организмах, является весьма сложной задачей в силу ограниченности классического математического аппарата. В настоящее время для решения подобных задач все большую популярность приобретают методы нечеткой логики, нейронных сетей. Более традиционным подходом является использование динамически детерминированных моделей на основе так называемой, «модели серого ящика», когда структура модели задается априорно, исходя из определенных эмпирических соображений, а численные значения параметров модели определяются расчетным путем на основе данных экспериментов [1, 2, 5, 7]. Примером такого подхода, в частности, является модель кривой лактации Вуда [1].

Сложность формализации коровы как биологического объекта синтеза молока заключается как в нестационарности величины суточных надоев молока за лактационный период, так и величины текущего разового надоя. Для рассматриваемого в данной работе процесса молокообразования в вымени коровы предлагается математическое описание скорости молокообразования в вымени в следующем виде:

$$(1) \quad \frac{dy}{d\tau} = \begin{cases} v_0, & y < y_{\max}, \\ 0, & y \geq y_{\max}, \end{cases}$$

где y – количество молока в вымени, образовавшееся с момента окончания последнего доения, кг; τ – время, прошедшее с момента окончания последнего доения, ч; y_{\max} – некоторое максимально допустимое количество молока в вымени, при достижении которого прекращается процесс дальнейшего молокообразования, кг; v_0 – скорость секреции молока до момента наполнения вымени, кг/ч.

Таким образом, скорость секреции молока в вымени $v = dy/d\tau$ постоянна до тех пор, пока объем накопленного в вымени молока y меньше некоторого максимального объема y_{\max} . Для учета инертности физиологических реакций организма коровы на опустошение вымени по окончании доения, а также на полное заполнение вымени и прекращение дальнейшего молокообразования в модель введены два аperiodических звена 1-го порядка, соответственно:

$$(2) \quad W_1(s) = \frac{1}{T_1 \cdot s + 1},$$

$$(3) \quad W_2(s) = \frac{1}{T_2 \cdot s + 1},$$

Значение y_0 моделирует начальное условие – остаток молока в вымени коровы по окончании последнего доения. В первом приближении полагаем $y_0 = 0.5$ кг.

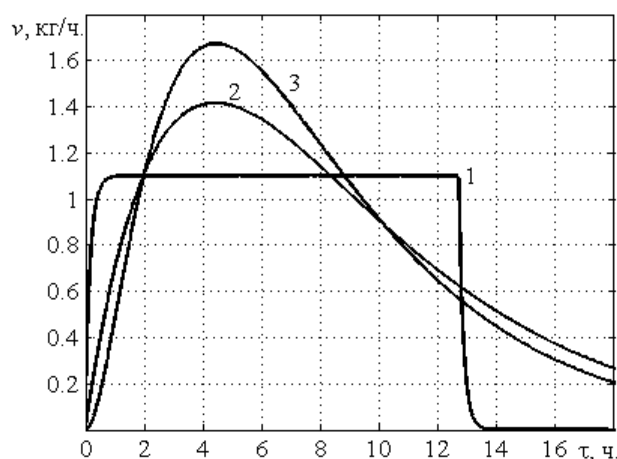


Рис. 2. Изменение скорости молокообразования в зависимости от времени с момента окончания последнего доения: 1 – для нелинейной модели (1)-(4); 2 – для аperiodического звена 2-го порядка; 3 – для аperiodического звена 3-го порядка.

Структура предлагаемой математической модели скорости молокообразования, реализованная в компьютерной среде математического моделирования Simulink, представлена на рис. 3.

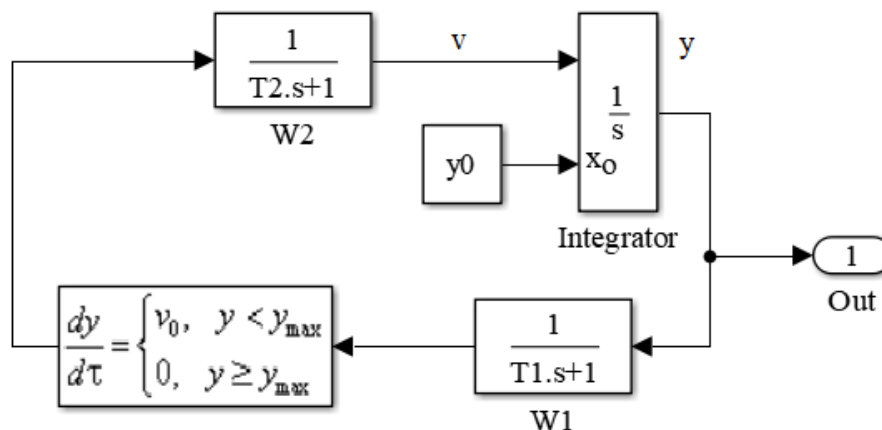


Рис. 3. Нелинейная математическая модель скорости молокообразования в вымени коровы.

Таким образом, в соответствии с данной динамической моделью, количество молока в вымени коровы, образовавшееся к моменту времени τ , прошедшему после окончания последнего доения, является нелинейной функцией, зависящей от значений параметров T_1 , T_2 , y_{\max} :

$$(4) \quad y = f_{T_1, T_2, y_{\max}}(\tau).$$

Значения параметров модели T_1 , T_2 , y_{\max} определяются физиологическими особенностями данной конкретной коровы, ее уровнем молочной продуктивности и могут изменяться со временем от момента отела до окончания периода лактации. Для определения численных значений параметров T_1 , T_2 , y_{\max} в данной работе задача многопараметрической оптимизации решалась численным методом покоординатного поиска с использованием численного имитационного моделирования. В качестве целевой функции использовалась среднее квадратическое отклонение N значений последовательных реальных надоев от аппроксимации (4):

$$(5) \quad z = \left(\sum_{j=1}^N \frac{(y_j^* - f_{T_1, T_2, y_{\max}}(\tau_j))^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min_{T_1, T_2, y_{\max}}.$$

Так как данный подход к оценке параметров T_1 , T_2 , y_{\max} модели характеризуется достаточно большой вычислительной сложностью, то для упрощения и линеаризации модели (1)-(4) предложено использовать аperiodическое звено 2-го либо 3-го порядка:

$$(6) \quad W_2(s) = \frac{y_{\max}}{(T_3 \cdot s + 1)(T_4 \cdot s + 1)}.$$

$$(7) \quad W_3(s) = \frac{y_{\max}}{(T_5 \cdot s + 1)(T_6 \cdot s + 1)(T_7 \cdot s + 1)}.$$

Таким образом, параметры моделей (1)-(4), (6), (7) могут быть определены численно по результатам регистрации значений надоев y и промежутков времени τ между доениями за последние N дней, например, за предшествующую неделю.

Результаты численной оценки адекватности предложенных моделей молокообразования представлены на рис. 4. Расчеты проведены на основании реальных надоев выбранной коровы за 7 дней при трехразовом доении. Соответствующие числовые значения параметров моделей равны:

для нелинейной модели (1)-(4):

$$\left[\begin{array}{l} \frac{dy}{d\tau} = \begin{cases} 1.2, & y < 12.6, \\ 0, & y \geq 12.6, \end{cases} \\ W_3(s) = \frac{1}{(2/3 \cdot s + 1)}, \\ W_4(s) = \frac{1}{(1/6 \cdot s + 1)}, \end{array} \right.$$

для апериодического звена 2-го порядка:

$$W_2(s) = \frac{17.0}{(7/3 \cdot s + 1)(7/3 \cdot s + 1)},$$

для апериодического звена 3-го порядка:

$$W_3(s) = \frac{17.0}{(5/3 \cdot s + 1)(5/3 \cdot s + 1)(2 \cdot s + 1)}.$$

Таким образом, для целей прогнозирования единичного надоя от коровы с учетом интервала времени между последовательными доениями может быть использована предложенная математическая модель скорости молокообразования в виде апериодического звена 2-го порядка (6).

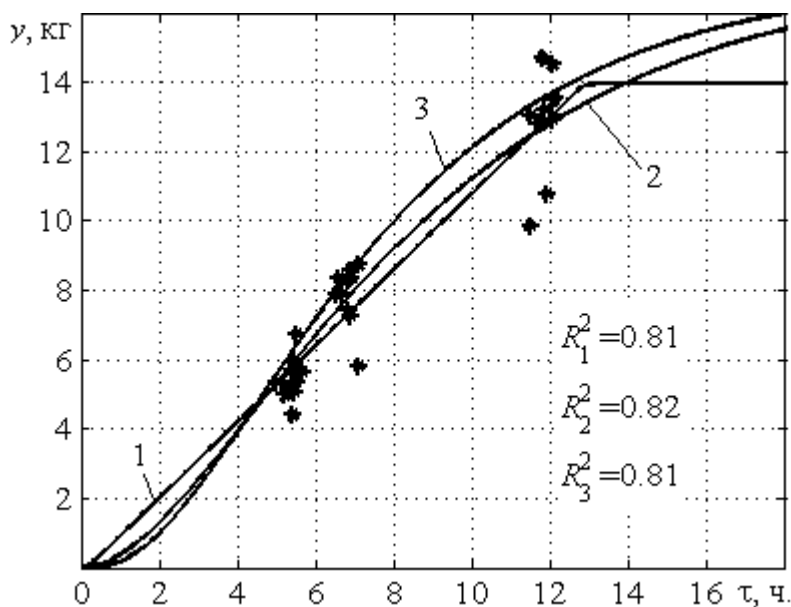


Рис. 4. Численная оценка точности рассматриваемых математических моделей скорости молокообразования.

На основе данных моделей разработаны метод динамической экспресс-оценки оптимальности выдерживаемых интервалов между доениями коровы с точки зрения повышения ее молочной продуктивности и имитационная модель сравнения эффективности двух- и трехкратного доения коров в условиях конкретного молочно-товарного комплекса с учетом дополнительных затрат.

3. Заключение

Впервые обосновано применение модели накопления молока в вымени коровы в зависимости от времени, прошедшего после окончания предыдущего доения, в виде апериодического звена 2-го порядка с промежутком усреднения порядка 7 дней. Модели не противоречат зоотехническим данным, но использование методики пассивного эксперимента, позволяющих без нарушения физиологического ритма коровы получить необходимый набор данных прямо в условиях действующего производства. Разработанные модели оценки влияния промежутка времени на надой молочных коров, полученные путем обработки больших массивов реальных данных из системы управления стадом, позволяют решать ряд прикладных задач. Эти результаты могут быть использованы в многопараметрической модели идентификации животных. Оценка отклонений реальной продуктивности коров от прогнозных модельных значений может быть положена в основу диагностики состояния животных, а также выполнения параметров технологии кормления и содержания животных. Эта модель может быть использована и при технико-экономической оценке выбора кратности доения коров для конкретных производственных условий как при предпроектных расчетах, так и в условиях реальной молочно-товарной фермы или комплекса.

Список литературы

1. Thornley J.H.M., France J. Mathematical models in agriculture. Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences. CABI, 2007. P. 847.
2. Лапотко А.М., Песоцкий Н.И. Сколько раз? – 1, 2, 3, или 4... и в какой час выгодно доить корову // Наше сельское хозяйство. 2010. № 11. С. 27-31.
3. Лапотко, А.М., Песоцкий Н.И. Сколько раз? – 1, 2, 3, или 4... и в какой час выгодно доить корову // Наше сельское хозяйство. 2010. № 12. С. 70-76.
4. Марченко Г. Влияние содержания коров на их молочную продуктивность // Молочное и мясное скотоводство. 1996. № 2. С. 6-8.
5. Тернов Е.В. Автоматизированное адаптивное управление молочным стадом КРС с графоаналитическим структурированием данных и эталонными моделями продуктивности: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06: защищена 28.04.2016: утв. 26.10.2016. Минск, 2016. 133 с.
6. Грищенко А.Б., Гируцкий И.И., Сеньков А.Г. Экспериментально-теоретические исследования средств идентификации дойных коров // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомственный тематический сборник. Вып. 49. Минск : НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2015. С. 173-178.
7. Эйкхоф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. М.: Мир, 1975. 681 с.