

# РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ КОЛМОГОРОВА ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО ГРАФА СОСТОЯНИЙ МОБИЛЬНОГО КОРМОЦЕХА

## SOLUTION OF THE KOLMOGOROV SYSTEM OF EQUATIONS FOR THE GENERALIZED GRAPH OF STATES OF A MOBILE FEED HOPPER

**А.И. КУПРЕЕНКО**, д.т.н.  
**Х.М. ИСАЕВ**, к.э.н.  
**С.М. МИХАЙЛИЧЕНКО**

Брянский государственный аграрный университет,  
Брянская область, с. Кокино, Россия, kupreenkoai@mail.ru

**A.I. KUPREENKO**, DSc in Engineering  
**KH.M. ISAEV**, PhD in Economics  
**S.M. MIKHAYLICHENKO**

Bryansk State Agricultural Academy, Kokino, Bryansk Oblast,  
Russia, kupreenkoai@mail.ru

Для определения вероятностного времени кормления животных мобильными кормоцехами на фермах КРС требуется решить систему уравнений Колмогорова. Из-за массивности расчетов эту работу можно выполнить только при использовании вычислительной техники. Однако конкретная система уравнений Колмогорова подходит только для определенного количества компонентов в кормосмеси. В зависимости от выбранного рациона кормления это количество может существенно меняться. Решение систем уравнений Колмогорова для кормосмесей с различным количеством компонентов является очень трудоемким процессом. Поэтому требуется разработать математическую модель, позволяющую решать задачу по определению вероятностного времени кормления для многокомпонентных кормосмесей. В ходе работы использовались положения теории случайных процессов, теории графов и основы математического моделирования. Для выполнения поставленной задачи были составлены и решены системы уравнений Колмогорова для 2-, 3- и 4-компонентной кормосмесей. Сочетания интенсивностей « $\lambda_{ij}$ » заменялись коэффициентами « $K_i$ », введенными для визуального восприятия формул и возможности выявить закономерности их развития при изменении количества компонентов. Обнаруженные закономерности отражены в алгоритме. Также представлено итоговое решение рассмотренных систем уравнений Колмогорова, и получена общая формула для вычисления вероятности нахождения мобильного кормоцеха в состоянии раздачи корма. Формула состоит из коэффициентов « $K_i$ », которые вычисляются по разработанному алгоритму. Таким образом, при использовании предложенного алгоритма исключается необходимость в составлении и решении систем уравнений Колмогорова для определения вероятности нахождения мобильного кормоцеха в состоянии раздачи корма. Обнаруженные закономерности удобно реализовать в электронной среде, например MS Excel, что позволит осуществлять моделирование технологического процесса приготовления и раздачи кормосмесей с различным количеством компонентов.

**Ключевые слова:** теория графов, уравнения Колмогорова, мобильный кормоцех, раздача кормосмеси, время кормления.

To determine the probabilistic time for feeding animals with mobile feeders on farms of cattle, it is required to solve the system of Kolmogorov equations. Because of the massive calculations, this work can be done only with the use of computer technology. However, a specific Kolmogorov system of equations is suitable only for a certain number of components in the feed mix. Depending on the chosen feeding ration, this amount can vary significantly. Solving the Kolmogorov equations for feed mixtures with a different number of components is a very laborious process. Therefore, it is required to develop a mathematical model that allows solving the problem of determining the probabilistic feeding time for multicomponent fodder mixtures. In the course of this work, the positions of the theory of random processes, the theory of graphs, and the foundations of mathematical modeling were used. To accomplish the task, Kolmogorov's system of equations for 2-, 3-, and 4-component fodder mixtures was compiled and solved. The combinations of intensities « $\lambda_{ij}$ » were replaced by the coefficients « $K_i$ », introduced for visual perception of formulas and the possibility to reveal the patterns of their development with a change in the number of components. The observed regularities are reflected in the algorithm. The final solution of the Kolmogorov equations is also presented, and a general formula is obtained for calculating the probability of finding a mobile feed hopper in the state of distribution of feed. The formula consists of the coefficients « $K_i$ », which are calculated according to the developed algorithm. Thus, using the proposed algorithm, there is no need to compile and solve Kolmogorov's systems of equations to determine the probability of finding a mobile feed mill in the state of distribution of food. The observed regularities are conveniently implemented in an electronic environment, for example, MS Excel, which will allow modeling of the technological process of preparation and distribution of feed mixes with a different number of components.

**Keywords:** graph theory, Kolmogorov equations, mobile feed mill, distribution of feed mix, feeding time.

## Введение

Для определения времени одного кормления животных мобильным кормоцехом на фермах по предложенной ранее методике [1–4] необходимо вычислить вероятность нахождения мобильного кормоцеха в состоянии раздачи корма. При этом необходимо учесть тот факт, что количество компонентов в кормосмеси может существенно меняться в зависимости от выбранных рационов. Ранее уже были рассмотрены случаи с кормосмесью, состоящей из 2 и 5 компонентов [5–7]. В дальнейшем, для повышения эффективности математической модели, был предложен обобщенный граф, позволяющий рассматривать процесс приготовления и раздачи кормов мобильным кормоцехом для кормосмесей, включающих от 2 до 25 компонентов [8]. Также был разработан алгоритм для составления системы уравнений Колмогорова к данному графу, и представлена итоговая формула для расчета вероятности нахождения мобильного кормоцеха в состоянии раздачи корма. Однако содержание этой формулы не было раскрыто. Также не были представлены выявленные закономерности при решении системы уравнений Колмогорова для кормосмесей с различным количеством компонентов.

## Цель исследования

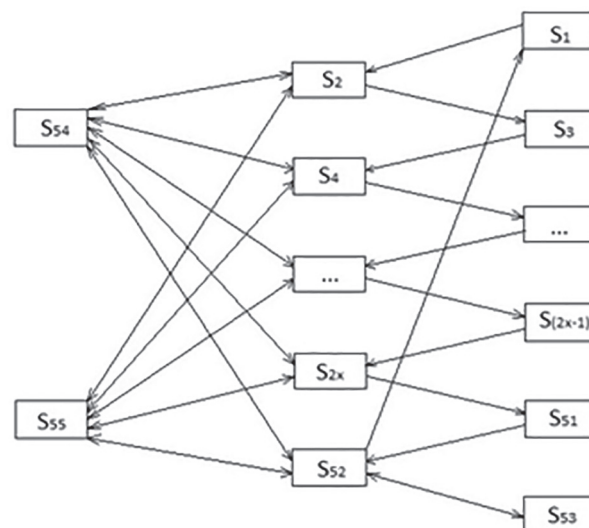
Целью исследования является разработка математической модели, позволяющей решать систему уравнений Колмогорова для обобщенного графа состояний мобильного кормоцеха с использованием ЭВМ.

Объектом исследования является технологический процесс приготовления и раздачи кормов мобильным кормоцехом на ферме. Метод исследования основан на теории случайных процессов, теории графов и математическом моделировании.

## Материалы, методы исследования и их обсуждение

С целью нахождения времени кормления животных мобильными кормоцехами для 2-, 3- и 4-компонентной кормосмесей были составлены соответствующие системы уравнений Колмогорова по разработанному алгоритму к обобщенному графу (рис. 1).

В связи с тем что интенсивность перехода мобильного кормоцеха из состояния загрузки



**Рис. 1. Обобщенный граф состояний мобильного кормоцеха при многокомпонентной кормосмеси:**

$x$  – количество компонентов в кормосмеси (до 25 компонентов);  $S_1$  – переезд от места стоянки к 1-му хранилищу кормов;  $S_3, \dots, S_{(2x-1)}$  – переезды мобильного кормоцеха между хранилищами кормов;  $S_2, S_4, \dots, S_{2x}$  – погрузка компонентов кормосмеси;  $S_{51}$  – переезд от последнего хранилища кормов к животноводческим помещениям;  $S_{52}$  – раздача кормосмеси;  $S_{53}$  – разворот при переезде на другую линию раздачи;  $S_{54}$  – технологическое нарушение;  $S_{55}$  – технический отказ

компонента ( $S_2, S_4, \dots, S_{2x}$ ) в состояние переезда ( $S_3, S_5, \dots, S_{51}$ ) не зависит от состояния переезда, для упрощения математической модели можно сделать следующее допущение о равенстве интенсивностей переходов между состояниями:  $\lambda_{2x,51} = \lambda_{2x,2x+1}$ , где  $x$  – количество компонентов кормосмеси.

Ранее так же были приняты допущения [8]:

$$\begin{aligned} \lambda_{2,54} &= \lambda_{4,54} = \dots = \lambda_{2x,54} = \lambda_{52,54}, \\ \lambda_{54,2} &= \lambda_{54,4} = \dots = \lambda_{54,2x} = \lambda_{54,52}, \\ \lambda_{2,55} &= \lambda_{4,55} = \dots = \lambda_{2x,55} = \lambda_{52,55}, \\ \lambda_{55,2} &= \lambda_{55,4} = \dots = \lambda_{55,2x} = \lambda_{55,52}. \end{aligned}$$

Системы уравнений Колмогорова для частных случаев (при  $x = 2, x = 3, x = 4$ ), составленные с учетом принятых допущений, приведены в табл. 1.

Нормировочное условие при решении системы уравнений Колмогорова:

$$p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_{54} + p_{55} = 1.$$

Для наглядности систему уравнений Колмогорова, составленную по алгоритму, можно

Таблица 1

Системы уравнений Колмогорова (при  $x = 2, x = 3, x = 4$ )

	$x = 2$	$x = 3$	$x = 4$
№1	$p_1\lambda_{1,2} = p_{52}\lambda_{52,1}$		
№2	$p_2(\lambda_{2,3} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}) = p_1\lambda_{1,2} + p_{54}\lambda_{54,52} + p_{55}\lambda_{55,52}$		
№3	$p_3\lambda_{3,4} = p_2\lambda_{2,3}$		
№4	$p_4(\lambda_{4,5} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}) = p_3\lambda_{3,4} + p_{54}\lambda_{54,52} + p_{55}\lambda_{55,52}$		
№5	---	$p_5\lambda_{5,6} = p_4\lambda_{4,5}$	
№6	---	$p_6(\lambda_{6,7} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}) = p_5\lambda_{5,6} + p_{54}\lambda_{54,52} + p_{55}\lambda_{55,52}$	
№7	---	---	$p_7\lambda_{7,8} = p_6\lambda_{6,7}$
№8	---	---	$p_8(\lambda_{8,9} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}) = p_7\lambda_{7,8} + p_{54}\lambda_{54,52} + p_{55}\lambda_{55,52}$
№2x+1	$p_{51}\lambda_{51,52} = p_4\lambda_{4,5}$	$p_{51}\lambda_{51,52} = p_6\lambda_{6,7}$	$p_{51}\lambda_{51,52} = p_8\lambda_{8,9}$
№2x+2	$p_{52}(\lambda_{52,1} + \lambda_{52,53} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}) = p_{51}\lambda_{51,52} + p_{53}\lambda_{53,52} + p_{54}\lambda_{54,52} + p_{55}\lambda_{55,52}$		
№2x+3	$p_{53}\lambda_{53,52} = p_{52}\lambda_{52,53}$		
№2x+4	$p_{54} \cdot 3\lambda_{54,52} = \lambda_{52,54}(p_2 + p_4 + p_{52})$	$p_{54} \cdot 4\lambda_{54,52} = \lambda_{52,54}(p_2 + p_4 + p_6 + p_{52})$	$p_{54} \cdot 5\lambda_{54,52} = \lambda_{52,54}(p_2 + p_4 + p_6 + p_8 + p_{52})$
№2x+5	$p_{55} \cdot 3\lambda_{55,52} = \lambda_{52,55}(p_2 + p_4 + p_{52})$	$p_{55} \cdot 4\lambda_{55,52} = \lambda_{52,55}(p_2 + p_4 + p_6 + p_{52})$	$p_{55} \cdot 5\lambda_{55,52} = \lambda_{52,55}(p_2 + p_4 + p_6 + p_8 + p_{52})$

представить в виде цепочки уравнений для нахождения следующих вероятностей:

$$\begin{aligned}
 & p_1 \rightarrow p_{n_2} (m = 2) \rightarrow p_{n_1} (m = 2) \rightarrow \\
 & \rightarrow p_{n_2} (m = 3) \rightarrow p_{n_1} (m = 3) \rightarrow \dots \rightarrow \\
 & \rightarrow p_{n_2} (m = x) \rightarrow p_{n_1} (m = x) \rightarrow p_{2x} \rightarrow \\
 & \rightarrow p_{51} \rightarrow p_{52} \rightarrow p_{53} \rightarrow p_{54} \rightarrow p_{55},
 \end{aligned}$$

где  $n_2 = 2m - 2$ ;  $n_1 = 2m - 1$  при  $m = 2, 3, \dots, x$ .

На этапе решения систем уравнений Колмогорова для упрощения преобразования уравнений вводим соответствующие коэффициенты  $K_j$ , заменяя ими образующиеся по ходу преобразований сочетания интенсивностей  $\lambda_{i,j}$ . Нумерация уравнений соответствует разработанному ранее алгоритму. В общем виде введенные коэффициенты могут быть представлены в первой части алгоритма следующим образом.

**Алгоритм по составлению коэффициентов, часть 1**

Для уравнения под № 1 (для  $p_1$ ):  $K_1 = \frac{\lambda_{52,1}}{\lambda_{1,2}}$ .

Для уравнений под номерами  $n_2 = 2m - 2$ , где  $m = 2, 3, \dots, x$  (для  $p_2, p_4, \dots, p_{2x-2}$ ):

$$K_{n_2} = (\lambda_{n_2, (n_2+1)} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}).$$

Например, при  $x = 4$  (4-компонентная кормосмесь)  $n_2 = 2 \cdot 2 - 2 = 2, n_2 = 2 \cdot 3 - 2 = 4, n_2 = 2 \cdot 4 - 2 = 6$ , т.е. коэффициенты  $K_2, K_4$  и  $K_6$  для соответствующих вероятностей  $p_2, p_4$  и  $p_6$  в уравнениях № 2, 4, 6.

Для уравнений под номерами  $n_1 = 2m - 1$ , где  $m = 2, 3, \dots, x$  (для  $p_3, p_5, \dots, p_{2x-1}$ ):

$$K_{n_1} = \frac{\lambda_{(n_1-1), n_1}}{\lambda_{n_1, (n_1+1)}}.$$

Например, при  $x = 4$  (4-компонентная кормосмесь)  $n_1 = 2 \cdot 2 - 1 = 3, n_1 = 2 \cdot 3 - 1 = 5, n_1 = 2 \cdot 4 - 1 = 7$ , т.е. коэффициенты  $K_3, K_5$  и  $K_7$  для соответствующих вероятностей  $p_3, p_5$  и  $p_7$  в уравнениях № 3, 5, 7.

Для уравнения под номером  $2x$  (для  $p_{2x}$ ):

$$K_{2x} = (\lambda_{2x, (2x+1)} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}).$$

Например, при  $x = 2: p_{2x} = p_4, K_{2x} = K_4$ ; при  $x = 3: p_{2x} = p_6, K_{2x} = K_6$ ; при  $x = 4: p_{2x} = p_8, K_{2x} = K_8$  и т.д.

Для уравнения под номером  $2x+1$  (для  $p_{51}$ ):

$$K_{51}^x = \frac{\lambda_{2x, 2x+1}}{\lambda_{51, 52}}.$$

Для уравнения под номером  $2x+2$  (для  $p_{52}$ ):

$$K_{52} = \lambda_{52,1} + \lambda_{52,53} + \lambda_{52,54} + \lambda_{52,55}.$$

Для уравнения под номером  $2x+3$  (для  $p_{53}$ ):

$$K_{53} = \frac{\lambda_{52,53}}{\lambda_{53, 52}}.$$

Для уравнения под номером  $2x+4$  (для  $p_{54}$ ):

$$K_{54}^x = (x + 1)\lambda_{54, 52}.$$

Для уравнения под номером  $2x+5$  (для  $p_{55}$ ):

$$K_{55}^x = (x + 1)\lambda_{55, 52}.$$

Для наглядности последовательную совокупность данных коэффициентов « $K_i$ » для соответствующих вероятностей  $p_i$  также можно представить в виде следующей цепочки:

$$\begin{aligned} &K_1 \rightarrow K_{n_2} (m=2) \rightarrow K_{n_1} (m=2) \rightarrow \\ &\rightarrow K_{n_2} (m=3) \rightarrow K_{n_1} (m=3) \rightarrow \dots \rightarrow \\ &\rightarrow K_{n_2} (m=x) \rightarrow K_{n_1} (m=x) \rightarrow K_{2x} \rightarrow \\ &\rightarrow K_{51}^x \rightarrow K_{52} \rightarrow K_{53} \rightarrow K_{54}^x \rightarrow K_{55}^x, \end{aligned}$$

где  $n_2 = 2m - 2$ ;  $n_1 = 2m - 1$  при  $m = 2, 3, \dots, x$ .

Решая приведенные системы уравнений Колмогорова, вводим дополнительные коэффициенты (табл. 2) для нахождения соответ-

ствующих вероятностей, а также для возможности отследить закономерности их развития при изменении количества компонентов кормосмеси «х».

В общем виде данные коэффициенты могут быть представлены во второй части алгоритма следующим образом.

### Алгоритм по составлению коэффициентов, часть 2

Для вероятности  $p_2$  (например, общий вид уравнения на основании табл. 1:

$$p_2 = p_1 K_2^a + p_{54} K_2^b + p_{55} K_2^c):$$

$$K_2^a = \frac{K_1}{K_2} \lambda_{1,2}; \quad K_2^b = \frac{\lambda_{54,52}}{K_2}; \quad K_2^c = \frac{\lambda_{55,52}}{K_2}.$$

Таблица 2

Коэффициенты, введенные в процессе решения

	$x=2$	$x=3$	$x=4$
$p_2$		$K_2^a = \frac{K_1}{K_2} \lambda_{1,2}; \quad K_2^b = \frac{\lambda_{54,52}}{K_2}; \quad K_2^c = \frac{\lambda_{55,52}}{K_2}$	
$p_4$		$K_4^a = \frac{K_2^a K_3 \lambda_{3,4}}{K_4}; \quad K_4^b = \frac{K_2^b K_3 \lambda_{3,4} + \lambda_{54,52}}{K_4}; \quad K_4^c = \frac{K_2^c K_3 \lambda_{3,4} + \lambda_{55,52}}{K_4}$	
$p_6$	---	$K_6^a = \frac{K_4^a K_5 \lambda_{5,6}}{K_6}; \quad K_6^b = \frac{K_4^b K_5 \lambda_{5,6} + \lambda_{54,52}}{K_6}; \quad K_6^c = \frac{K_4^c K_5 \lambda_{5,6} + \lambda_{55,52}}{K_6}$	
$p_8$	---	---	$K_8^a = \frac{K_6^a K_7 \lambda_{7,8}}{K_8}; \quad K_8^b = \frac{K_6^b K_7 \lambda_{7,8} + \lambda_{54,52}}{K_8};$ $K_8^c = \frac{K_6^c K_7 \lambda_{7,8} + \lambda_{55,52}}{K_8}$
$p_{52}$	$K_{52}^{2a} = 1 - \frac{K_4^a K_{51}^2 \lambda_{51,52} + K_{53} \lambda_{53,52}}{K_{52}}$ $K_{52}^{2b} = \frac{K_4^b K_{51}^2 \lambda_{51,52} + \lambda_{54,52}}{K_{52}}$ $K_{52}^{2c} = \frac{K_4^c K_{51}^2 \lambda_{51,52} + \lambda_{55,52}}{K_{52}}$	$K_{52}^{3a} = 1 - \frac{K_6^a K_{51}^3 \lambda_{51,52} + K_{53} \lambda_{53,52}}{K_{52}}$ $K_{52}^{3b} = \frac{K_6^b K_{51}^3 \lambda_{51,52} + \lambda_{54,52}}{K_{52}}$ $K_{52}^{3c} = \frac{K_6^c K_{51}^3 \lambda_{51,52} + \lambda_{55,52}}{K_{52}}$	$K_{52}^{4a} = 1 - \frac{K_8^a K_{51}^4 \lambda_{51,52} + K_{53} \lambda_{53,52}}{K_{52}}$ $K_{52}^{4b} = \frac{K_8^b K_{51}^4 \lambda_{51,52} + \lambda_{54,52}}{K_{52}}$ $K_{52}^{4c} = \frac{K_8^c K_{51}^4 \lambda_{51,52} + \lambda_{55,52}}{K_{52}}$
$p_{54}$	$K_{54}^{2a} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^a + K_4^a + 1)}{K_{54}^2}$ $K_{54}^{2b} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^b + K_4^b)}{K_{54}^2}$ $K_{54}^{2c} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^c + K_4^c)}{K_{54}^2}$ $K_{54}^{2\Sigma} = \frac{K_{52}^{2a} K_{54}^{2a} + K_{54}^{2b} K_{52}^{2a}}{K_{52}^{2a} - K_{52}^{2b} K_{54}^{2a} - K_{54}^{2c} K_{52}^{2a}}$	$K_{54}^{3a} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^a + K_4^a + K_6^a + 1)}{K_{54}^3}$ $K_{54}^{3b} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^b + K_4^b + K_6^b)}{K_{54}^3}$ $K_{54}^{3c} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^c + K_4^c + K_6^c)}{K_{54}^3}$ $K_{54}^{3\Sigma} = \frac{K_{52}^{3a} K_{54}^{3a} + K_{54}^{3b} K_{52}^{3a}}{K_{52}^{3a} - K_{52}^{3b} K_{54}^{3a} - K_{54}^{3c} K_{52}^{3a}}$	$K_{54}^{4a} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^a + K_4^a + K_6^a + K_8^a + 1)}{K_{54}^4}$ $K_{54}^{4b} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^b + K_4^b + K_6^b + K_8^b)}{K_{54}^4}$ $K_{54}^{4c} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^c + K_4^c + K_6^c + K_8^c)}{K_{54}^4}$ $K_{54}^{4\Sigma} = \frac{K_{52}^{4a} K_{54}^{4a} + K_{54}^{4b} K_{52}^{4a}}{K_{52}^{4a} - K_{52}^{4b} K_{54}^{4a} - K_{54}^{4c} K_{52}^{4a}}$
$p_{55}$	$K_{55}^{2a} = K_1 + K_2^a + K_2^a K_3 + K_4^a + K_4^a K_{51}^2 + K_{53} + 1$ $K_{55}^{2b} = K_2^b + K_2^b K_3 + K_4^b + K_4^b K_{51}^2 + 1$ $K_{55}^{2c} = K_2^c + K_2^c K_3 + K_4^c + K_4^c K_{51}^2$	$K_{55}^{3a} = K_1 + K_2^a + K_2^a K_3 + K_4^a + K_4^a K_5 + K_6^a + K_6^a K_{51}^3 + K_{53} + 1$ $K_{55}^{3b} = K_2^b + K_2^b K_3 + K_4^b + K_4^b K_5 + K_6^b + K_6^b K_{51}^3 + 1$ $K_{55}^{3c} = K_2^c + K_2^c K_3 + K_4^c + K_4^c K_5 + K_6^c + K_6^c K_{51}^3$	$K_{55}^{4a} = K_1 + K_2^a + K_2^a K_3 + K_4^a + K_4^a K_5 + K_6^a + K_6^a K_7 + K_8^a + K_8^a K_{51}^4 + K_{53} + 1$ $K_{55}^{4b} = K_2^b + K_2^b K_3 + K_4^b + K_4^b K_5 + K_6^b + K_6^b K_7 + K_8^b + K_8^b K_{51}^4 + 1$ $K_{55}^{4c} = K_2^c + K_2^c K_3 + K_4^c + K_4^c K_5 + K_6^c + K_6^c K_7 + K_8^c + K_8^c K_{51}^4$

Для вероятностей  $p_{n_2}$ :  $n_2 = 2m - 2$ , где  $m = 3...x$ :

$$K_{n_2}^a = \frac{K_{(n_2-2)}^a \cdot K_{(n_2-1)} \cdot \lambda_{(n_2-1),n_2}}{K_{n_2}};$$

$$K_{n_2}^{\bar{o}} = \frac{K_{(n_2-2)}^{\bar{o}} \cdot K_{(n_2-1)} \cdot \lambda_{(n_2-1),n_2} + \lambda_{54,52}}{K_{n_2}};$$

$$K_{n_2}^6 = \frac{K_{(n_2-2)}^6 \cdot K_{(n_2-1)} \cdot \lambda_{(n_2-1),n_2} + \lambda_{55,52}}{K_{n_2}}.$$

Например: для индекса «а» коэффициенты имеют вид  $K_4^a, K_6^a \dots K_{2x-2}^a$  для вероятностей  $p_4, p_6 \dots p_{2x-2}$ , соответственно; для индексов « $\bar{o}$ » и «6» – аналогично.

Для вероятности  $p_{2x}$ :

$$K_{2x}^a = \frac{K_{(2x-2)}^a \cdot K_{(2x-1)} \cdot \lambda_{(2x-1),2x}}{K_{2x}};$$

$$K_{2x}^{\bar{o}} = \frac{K_{(2x-2)}^{\bar{o}} \cdot K_{(2x-1)} \cdot \lambda_{(2x-1),2x} + \lambda_{54,52}}{K_{2x}};$$

$$K_{2x}^6 = \frac{K_{(2x-2)}^6 \cdot K_{(2x-1)} \cdot \lambda_{(2x-1),2x} + \lambda_{55,52}}{K_{2x}}.$$

Например, при  $x = 2$ :  $K_{2x}^a = K_4^a$ , при  $x = 3$ :  $K_{2x}^a = K_6^a$ ; для « $\bar{o}$ » и «6» – аналогично.

Для вероятности  $p_{52}$ :

$$K_{52}^{xa} = 1 - \frac{K_{2x}^a K_{51}^x \lambda_{51,52} + K_{53} \lambda_{53,52}}{K_{52}};$$

$$K_{52}^{x\bar{o}} = \frac{K_{2x}^{\bar{o}} K_{51}^x \lambda_{51,52} + \lambda_{54,52}}{K_{52}};$$

$$K_{52}^{xB} = \frac{K_{2x}^B K_{51}^x \lambda_{51,52} + \lambda_{55,52}}{K_{52}}.$$

Для вероятности  $p_{54}$ :

$$K_{54}^{xa} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^a + \sum K_{n_2}^a + K_{2x}^a + 1)}{K_{54}^x};$$

$$K_{54}^{x\bar{o}} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^{\bar{o}} + \sum K_{n_2}^{\bar{o}} + K_{2x}^{\bar{o}})}{K_{54}^x};$$

$$K_{54}^{xB} = \frac{\lambda_{52,54} (K_2^B + \sum K_{n_2}^B + K_{2x}^B)}{K_{54}^x};$$

$$K_{54}^{x\Sigma} = \frac{K_{52}^{xB} K_{54}^{xa} + K_{54}^{xB} K_{52}^{xa}}{K_{52}^{xa} - K_{52}^{x\bar{o}} K_{54}^{xa} - K_{54}^{x\bar{o}} K_{52}^{xa}}.$$

Для вероятности  $p_{55}$ :

$$K_{55}^{xa} = K_2^a + K_2^a K_3 + \Sigma K_{n_2}^a + \Sigma K_{n_2}^a K_{n_1} + K_{2x}^a + K_{2x}^a K_{51}^x + K_{53} + 1 + K_1;$$

$$K_{55}^{x\bar{o}} = K_2^{\bar{o}} + K_2^{\bar{o}} K_3 + \Sigma K_{n_2}^{\bar{o}} + \Sigma K_{n_2}^{\bar{o}} K_{n_1} + K_{2x}^{\bar{o}} + K_{2x}^{\bar{o}} K_{51}^x + 1;$$

$$K_{55}^{xB} = K_2^B + K_2^B K_3 + \Sigma K_{n_2}^B + \Sigma K_{n_2}^B K_{n_1} + K_{2x}^B + K_{2x}^B K_{51}^x;$$

где  $\Sigma K_{n_2}^a = K_4^a + K_6^a + \dots + K_{2x-2}^a$ ;  
 $\Sigma K_{n_1}^a = K_5 + K_7 + \dots + K_{2x-1}$ ;  
 $\Sigma K_{n_2}^a K_{n_1} = K_4^a K_5 + K_6^a K_7 + \dots + K_{2x-2}^a K_{2x-1}$ ;

Таблица 3

Итоговое решение

$x = 2$	$x = 3$	$x = 4$
$p_1 = p_{52} K_1$		
$p_2 = p_{52} K_2^a + p_{54} K_2^{\bar{o}} + p_{55} K_2^B$		
$p_3 = p_2 K_3$		
$p_4 = p_{52} K_4^a + p_{54} K_4^{\bar{o}} + p_{55} K_4^B$		
---	$p_5 = p_4 K_5$	
---	$p_6 = p_{52} K_6^a + p_{54} K_6^{\bar{o}} + p_{55} K_6^B$	
---	---	$p_7 = p_6 K_7$
---	---	$p_8 = p_{52} K_8^a + p_{54} K_8^{\bar{o}} + p_{55} K_8^B$
$p_{51} = p_4 K_{51}^2$	$p_{51} = p_6 K_{51}^3$	$p_{51} = p_8 K_{51}^4$
$p_{52} = p_{55} \frac{K_{54}^{2\Sigma} K_{52}^{2\bar{o}} + K_{52}^{2B}}{K_{52}^{2a}}$	$p_{52} = p_{55} \frac{K_{54}^{3\Sigma} K_{52}^{3\bar{o}} + K_{52}^{3B}}{K_{52}^{3a}}$	$p_{52} = p_{55} \frac{K_{54}^{4\Sigma} K_{52}^{4\bar{o}} + K_{52}^{4B}}{K_{52}^{4a}}$
$p_{53} = p_{52} K_{53}$		
$p_{54} = p_{55} K_{54}^{2\Sigma}$	$p_{54} = p_{55} K_{54}^{3\Sigma}$	$p_{54} = p_{55} K_{54}^{4\Sigma}$
$p_{55} = \frac{K_{52}^{xa}}{K_{52}^{xa} + (K_{54}^{x\Sigma} K_{52}^{x\bar{o}} + K_{52}^{xB}) K_{55}^{xa} + K_{54}^{x\Sigma} K_{55}^{x\bar{o}} K_{52}^{xa} + K_{55}^{xB} K_{52}^{xa}}$		

для индексов « $\bar{o}$ » и « $\bar{e}$ » – аналогично;  $n_2 = 2m - 2$ ,  $n_1 = 2m - 1$  при  $m = 3, 4 \dots x$ .

Например:

$$\text{при } x = 2 \quad \Sigma K_{n_2}^a + \Sigma K_{n_2}^a K_{n_1} = 0;$$

$$\text{при } x = 3 \quad \Sigma K_{n_2}^a + \Sigma K_{n_2}^a K_{n_1} = K_4^a + K_4^a K_5;$$

при  $x = 4$

$$\Sigma K_{n_2}^a + \Sigma K_{n_2}^a K_{n_1} = K_4^a + K_4^a K_5 + K_6^a + K_6^a K_7.$$

Итоговое решение с выраженными вероятностями  $p_i$  для рассмотренных систем уравнений приведено в табл. 3.

Таким образом, для определения искомой вероятности  $p_{s_2}$  нахождения мобильного кормоце-ха в состоянии раздачи корма при конкретном значении  $x$  необходимо выразить соответствующие коэффициенты  $K_i$  по рассмотренному выше алгоритму, найти значение вероятности  $p_{s_5}$ , а затем уже – значение вероятности  $p_{s_2}$ .

### Выводы

1. Пользуясь предложенным подходом, можно получить выражение вероятности нахождения мобильного кормоце-ха в состоянии раздачи корма для кормосмеси, включающей от 2 до 25 компонентов.

2. При использовании ЭВМ появляется возможность моделирования баланса времени процесса приготовления и раздачи кормосмесей с различным количеством компонентов.

### Литература

1. Купреенко А.И. Обоснование рациона и состава технологических линий производства кормового сырья и приготовления кормов (рекомендации). Брянск: БГСХА. 2005. 36 с.
2. Купреенко А.И. Баланс времени смены мобильного измельчителя-смесителя-раздатчика // Вестник Брянской ГСХА. 2006. № 1. С. 27–30.
3. Купреенко А.И. Разработка метода оптимизации энергосберегающих технологий и средств механизации приготовления кормов: дис. ... д-ра техн. наук. Рязань, 2006. 436 с.
4. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Ефименко С.В. К обоснованию выбора мобильного кормоце-ха для молочных ферм // Машинно-технологическое обеспечение животноводства – проблемы эффективности и качества. Сб. науч. тр. ВНИИМЖ, 2010. Т. II. Ч. II. С. 108–117.
5. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Исаханян А.В. Определение эксплуатационных показателей мобильных // Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. 2012. № 5. С. 25–27.
6. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Исаханян А.В. Трудоемкость приготовления и раздачи кормосмесей мобильными раздатчиками-смесителями // Вестник ВНИИМЖ. 2013. № 2 (10). С. 239–242.
7. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Полянская А.И. Определение времени одного кормления мобильным смесителем-раздатчиком // Вестник НГАУ. 2014. № 1 (30). С. 104–107.
8. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Определение эксплуатационных показателей мобильных кормоце-хов на основе теории графов // Инновационная техника и технология. 2017. № 1 (10). С. 24–28.

### References

1. Kupreenko A.I. Obosnovanie ratsiona i sostava tekhnologicheskikh liniy proizvodstva kormovogo syr'ya i prigotovleniya kormov (rekomendatsii) [Substantiation of the ration and composition of technological lines for the production of feed and feed preparation (recommendations)]. Bryansk: BGSKhA. 2005. 36 p.
2. Kupreenko A.I. The balance time for changing the mobile chopper-mixer-distributor. Vestnik Bryanskoy GSKhA. 2006. No 1, pp. 27–30 (in Russ.).
3. Kupreenko A.I. Razrabotka metoda optimizatsii energosberegayushchikh tekhnologiy i sredstv mekhanizatsii prigotovleniya kormov: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Development of a method for optimizing energy-saving technologies and mechanization of feed preparation: dissertation for degree of Doctor of Technical Sciences]. Ryazan', 2006. 436 p.
4. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Efimenko S.V. The rationale for selecting a mobile feeding station for dairy farms. Mashinno-tekhnologicheskoe obespechenie zhivotnovodstva – problemy effektivnosti i kachestva. Sb. nauch. tr. VNIIMZh [Machine-technological provision of livestock – problems of efficiency and quality], 2010. Vol. II. Ch. II, pp. 108–117 (in Russ.).
5. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Isakhanyan A.V. Definition of mobile performance indicators. Vestnik MGAU im. V.P. Goryachkina. 2012. No 5, pp. 25–27 (in Russ.).
6. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Isakhanyan A.V. The laboriousness of preparing and distributing feed mixes by mobile dispensers-mixers. Vestnik VNIIMZh. 2013. No 2(10), pp. 239–242 (in Russ.).
7. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Polyanskaya A.I. Determination of the time of one feeding by a mobile mixer-distributor. Vestnik NGAU. 2014. No 1 (30), pp. 104–107 (in Russ.).
8. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhaylichenko S.M. Determination of the operational performance of mobile feed mills based on graph theory. Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya. 2017. No 1 (10), pp. 24–28 (in Russ.).