



УДК. 631.362.3.004.4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

Михайлов Е.В., д.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет**Тел. (0619) 421265*

Аннотация – в статье представлено решение системы дифференциальных уравнений по моделированию процессов функционирования технических средств послеуборочной обработки зерна.

Ключевые слова – моделирование, послеуборочная обработка зерна (ПУОЗ), техническая оснащенность (ТО), зерноочистительные машины (ЗОМ).

Постановка проблемы. При рациональном обосновании основных параметров ЗОМ и агрегатов должны быть правильно организованы технологические процессы, которые отвечают следующим требованиям: поточность (критерий минимума затрат), качество обрабатываемой продукции и показатель потерь зерна. При этом учитывается сложный характер взаимодействия уборочной техники (поступление исходного материала на зернокомплексы), транспортных средств и машин для ПУОЗ, погодных условий и характеристик зерновых материалов - засоренности, влажности, натуры и др.

Вышеупомянутые особенности предусматривают необходимость в использовании вероятностных методов системного анализа, имитационного моделирования - одного из наиболее мощных и универсальных методов изучения процесса функционирования объектов сложной структуры [1].

Анализ последних исследований. Анализ механизированных процессов в растениеводстве и животноводстве, проведенный С. В. Кардашевским, Л. В. Погорелым и др. [2,3], позволяет сформулировать основные характерные особенности сложных систем относительно комплексов сельскохозяйственных машин, использованных для осуществления этих процессов [4, 10]:

- наличие иерархической структуры - принципиальная возможность расчленения системы на взаимодействующие между собой элементы и подсистемы, которые выполняют разные технологические, организационные и производственные функции;



- стохастический характер процессов функционирования подсистем и элементов, который заключается в их взаимодействии с постоянно и случайным образом меняющимися факторами внешней среды и внутренними возмущениями;

- наличие общей для системы целенаправленной задачи и конкурирующих целей функционирования подсистем при наложении ограничений технического, технологического и экономического характера;

- систематическая направленность системы управления на достижение определенных показателей эффективности путем целенаправленного влияния обслуживающего персонала.

В этом случае рассматривается факт, что даже если каждый элемент или подсистема имеют оптимальные конструктивные или функциональные характеристики, то поведение всей системы может оказаться нерациональной из-за взаимодействия между элементами и подсистемами. Системный подход при изучении поведения больших (сложных) систем изложен в работе Н. П. Бусленко [5-10].

Для комплексов ПУОЗ в разной мере характерны все изложенные черты, что позволяет рассматривать процессы их функционирования, как процессы сложных систем [11-15].

Цель исследования - создание теоретических основ для моделирования и обеспечения эффективной работы технических объектов (систем) в процессе их эксплуатации.

Основная часть. Рассмотрим возможные варианты последовательности основных технологических процессов послеуборочной обработки и складирования товарного зерна и семян [1].

Основное технологическое оборудование делится на две группы: машины для обработки ненормализованного (свежеубранного или частично подработанного) и машины для обработки нормализованного (предварительно очищенного и высушенного) зерна. К первой группе относятся машины для предварительной очистки зерна и его сушки, а ко второй – для окончательной очистки и сортирования материала. Условия работы машин второй группы более благоприятны, чем первой.

Оборудование на предприятиях расстанавливают таким образом, чтобы технологические операции выполнялись последовательно, и тем самым обеспечивалось доведение зернового материала до посевных, базисных или ограничительных кондиций за один пропуск или проход [10].

Описание функционирования системы представляет граф возможных вариантов последовательности основных технологических процессов послеуборочной обработки и складирования товарного зерна и семян (рис.1).

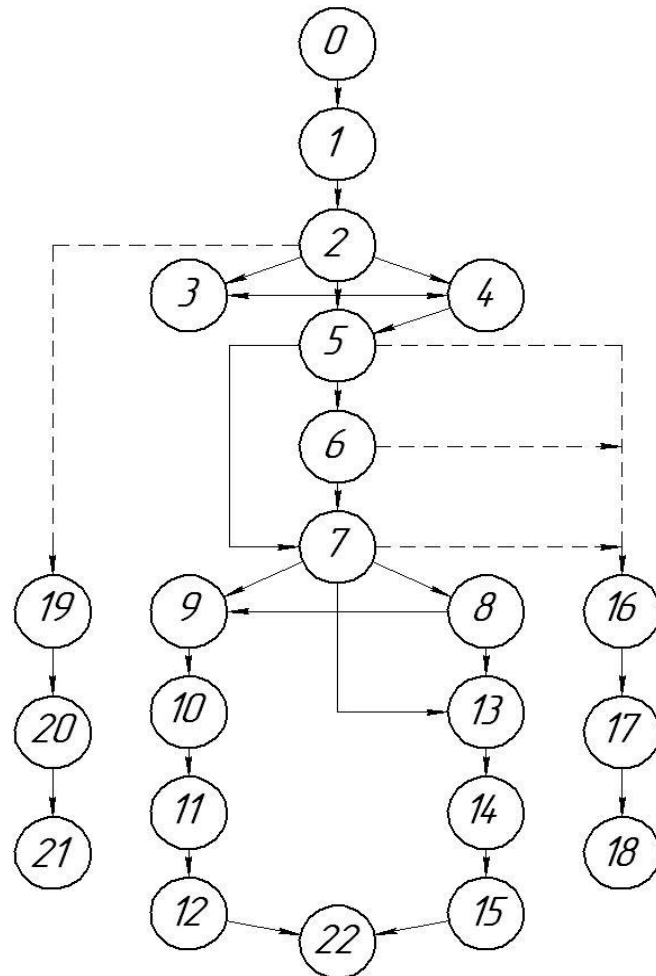


Рис. 1. Граф возможных вариантов последовательности основных технологических процессов послеуборочной обработки и складирования товарного зерна и семян.

Функционирование системы ПУОЗ представлено следующими технологическими операциями (рис.1): 0 – взвешивание вороха; 1 – разгрузка вороха; 2 – предварительная очистка; 3 – временное хранение, активное вентилирование; 4 – сушка; 5 – первичная очистка; 6 – вторичная очистка; 7 – триерование; 8 – очистка на пневмосортировальном столе; 9 – затаривание и взвешивание мешков; 10 – зашивание и укладывание мешков; 11 – перевозка мешков; 12 – укладка мешков в зернохранилище; 13 – загрузка и взвешивание авто; 14 – перевозка зерна; 15 – загрузка в зернохранилище; 16 – загрузка и взвешивания фуража; 17 – перевозка зернофуража; 18 – складирование фуража; 19 – загрузка незерновых отходов; 20 – перевозка отходов; 21 – утилизация отходов; 22 – хранение зерна.

Система последовательности основных технологических процессов послеуборочной обработки и складирования товарного зерна и семян представляется в виде дифференциальных уравнений (1).



$$\left\{ \begin{array}{l}
 p'_0(t) = -\lambda_1 p_0(t) \\
 p'_1(t) = \lambda_1 p_0(t) - \lambda_2 p_1(t) \\
 p'_2(t) = \lambda_2 p_1(t) - \lambda_3 p_2(t) - \lambda_4 p_2(t) - \lambda_5 p_2(t) - \lambda_{19} p_2(t) \\
 p'_3(t) = \lambda_3 p_2(t) + \lambda_4 p_3(t) \\
 p'_4(t) = \lambda_4 p_2(t) + \lambda_4 p_3(t) + \lambda_3 p_4(t) - \lambda_5 p_4(t) \\
 p'_5(t) = \lambda_5 p_4(t) + \lambda_5 p_2(t) - \lambda_6 p_5(t) - \lambda_{16} \cdot p_5(t) - \lambda_7 p_5(t) \\
 p'_6(t) = \lambda_6 p_5(t) - \lambda_7 p_6(t) - \lambda_{16} \cdot p_6(t) \\
 p'_7(t) = \lambda_7 p_5(t) + \lambda_7 p_6(t) - \lambda_{13} p_7(t) - \lambda_9 \cdot p_7(t) - \\
 - \lambda_8 p_7(t) - \lambda_{16} \cdot p_7(t) \\
 p'_8(t) = \lambda_8 p_7(t) - \lambda_{13} p_8(t) - \lambda_{16} p_8(t) - \lambda_9 p_8(t) \\
 p'_9(t) = \lambda_9 p_7(t) + \lambda_9 p_8(t) - \lambda_{10} p_9(t) \\
 p'_{10}(t) = \lambda_{10} p_9(t) - \lambda_{11} p_{10}(t) \\
 p'_{11}(t) = \lambda_{11} p_{10}(t) - \lambda_{12} p_{11}(t) \\
 p'_{12}(t) = \lambda_{12} p_{11}(t) - \lambda_{22} p_{12}(t) \\
 p'_{13}(t) = \lambda_{13} p_8(t) + \lambda_{13} p_7(t) - \lambda_{14} p_{13}(t) \\
 p'_{14}(t) = \lambda_{14} p_{13}(t) - \lambda_{15} p_{14}(t) \\
 p'_{15}(t) = \lambda_{15} p_{14}(t) - \lambda_{22} p_{15}(t) \\
 p'_{16}(t) = \lambda_{16} p_7(t) + \lambda_{16} p_6(t) + \lambda_{16} p_5(t) - \lambda_{17} p_{16}(t) \\
 p'_{17}(t) = \lambda_{17} p_{16}(t) - \lambda_{18} p_{17}(t) \\
 p'_{18}(t) = \lambda_{18} p_{17}(t) \\
 p'_{19}(t) = \lambda_{19} p_2(t) - \lambda_{20} p_{19}(t) \\
 p'_{20}(t) = \lambda_{20} p_{19}(t) - \lambda_{21} p_{20}(t) \\
 p'_{21}(t) = \lambda_{21} p_{20}(t) \\
 p'_{22}(t) = \lambda_{22} p_{12}(t) + \lambda_{22} p_{15}(t)
 \end{array} \right. \quad (1)$$

Многоуровневую систему ПУОЗ [10] можно представить в виде графа и рассматривать ее в виде дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 p'_0(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2) p_0(t) \\
 p'_1(t) = \lambda_1 p_0(t) - \lambda_1 p_3(t) - \sum_{i=1}^k \lambda_{4i} p_1(t) \\
 p'_2(t) = \lambda_2 p_0(t) - \lambda_2 p_5(t) - \sum_{i=1}^k \lambda_{4i} p_2(t) \\
 p'_3(t) = \lambda_3 p_1(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_{4i} p_3(t) - \sum_{i=1}^k \lambda_{6i} p_3(t) \\
 p'_{4i}(t) = \lambda_{4i} p_1(t) + \lambda_{4i} p_2(t) - \lambda_3 p_{4i}(t) - \lambda_5 p_{4i}(t) \\
 p'_5(t) = \lambda_5 p_2(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_5 p_{4i}(t) - (\lambda_{61} + \lambda_{62} + \dots + \lambda_{6i}) \cdot p_5 \\
 p'_{6i}(t) = \lambda_{6i} p_3(t) + \lambda_{6i} p_5(t), \quad i = \overline{1, k}
 \end{array} \right. \quad (2)$$

где $-\lambda_{61}, \lambda_{62}, \dots, \lambda_{6i}$ – соответствует 5-му уровню – технологическим процессам ЗОМ (i_1, i_2, \dots, i_k), являющимися составляющими 2-го уровня.

В данном случае предприятие для ПУОЗ продовольственно-фуражного назначения предусматривает обязательными такие технологические процессы как предварительная и первичная очистки.

В случае, если 2-й уровень многоуровневой системы ПУОЗ представляет семеноводческое предприятие, то $\lambda_{71}, \lambda_{72}, \dots, \lambda_{7i}$ соответствует технологическим процессам машин и оборудования 5-го уровня (j_1, j_2, \dots, j_k).

При $t = 0$, начальные условия имеют вид:

$$p_0(0) = 1, p_i(0) = 0, i = 1, 2, \dots, 5.$$

Система уравнений решается методом Рунге-Кутты.

В таком случае, предусматривают следующие технологические процессы: предварительная, первичная и вторичная очистка; триерование; очистка и сортировка на пневмосортировальном столе; затаривание и взвешивание мешков; зашивание и укладывание мешков и другие.

Считая, что при $t = 0$ все элементы системы исправны, можно записать начальные условия: $p_0(0) = 1, p_i(0) = 0, i = 1, 2, \dots, k$. Систему можно решить двумя способами: аналитическим и численным. Однако получить решение в виде формулы для произвольного n можно для случая ограниченного числа элементов или при фиксированных значениях интенсивностей их отказа и восстановления. Существуют приближенные методы, позволяющие получить решение в аналитическом виде. Однако при этом возникают проблемы с оценкой погрешностей результатов вычисления показателей эффективности функционирования системы. Проще всего система их отказа и восстановления решается методом Рунге-Кутты.

Полученные значения используются в дальнейшем при нахождении риска системы.

Рассмотрим частный случай с участием 3-го уровня многоуровневой системы при ПУОЗ одной культуры (рис.2).

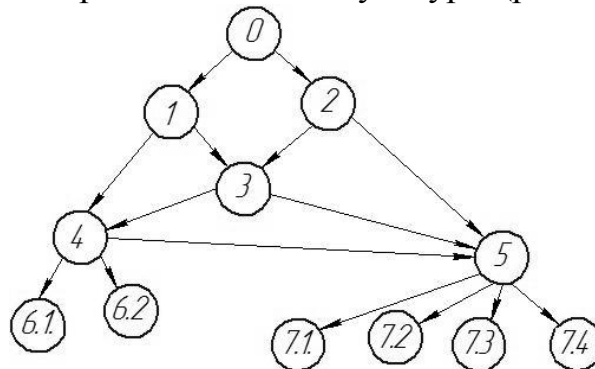


Рис. 2. Граф состояния системы ПУОЗ (1 культура).

Функционирование системы ПУОЗ представлены следующими технологическими операциями: 0 – взвешивание вороха; 1 – разгрузка



вороха; 2 – предварительная очистка; 3 – временное хранение, активное вентилирование; 4 – первичная очистка; 5 – вторичная очистка; 6.1 – загрузка и взвешивание авто; 6.2 – перевозка зерна; 7.1 – триерование; 7.2 – очистка на пневматическом сортировальном столе; 7.3 – затаривание и взвешивание мешков; 7.4 – зашивание и укладывание мешков.

Система представлена следующими дифференциальными уравнениями

$$\begin{cases} p_0'(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2) p_0(t) \\ p_1'(t) = \lambda_1 p_0(t) - \lambda_3 p_1(t) - \lambda_4 p_1(t) \\ p_2'(t) = \lambda_2 p_0(t) - \lambda_5 p_2(t) - \lambda_3 p_2(t) \\ p_3'(t) = \lambda_3 p_1(t) + \lambda_3 p_2(t) - \lambda_4 p_3(t) - \lambda_5 p_3(t) \\ p_4'(t) = \lambda_4 p_1(t) + \lambda_4 p_3(t) - \lambda_5 p_4(t) - \lambda_{61} p_4(t) - \lambda_{62} p_4(t) \\ p_5'(t) = \lambda_5 p_3(t) + \lambda_5 p_4(t) - \lambda_{71} p_5(t) - \lambda_{72} p_5(t) - \\ - \lambda_{73} p_5(t) - \lambda_{74} p_5(t) \end{cases} \quad (3)$$

При $t = 0$, начальные условия имеют вид:

$$p_0(0) = 1, p_i(0) = 0, i = 1, 2, \dots, k$$

Система уравнений решается методом Рунге-Кутты. Программная реализация в пакете MathCad представлена на рисунке 3:

```

λ4 := 6   λ5 := 7   λ62 := 6   λ71 := 5   λ74 := 6
p0 := 0   p1 := 0   p2 := 0   p3 := 0   p4 := 0   p5 := 0
ORIGIN := 0
p := (p0
      p1
      p2
      p3
      p4
      p5)
p = (0
     0
     0
     0
     0
     0)
D(t,p) := [
            -(λ1 + λ2) · p0
            λ1 · p0 - (λ3 + λ4) · p1
            λ2 · p0 - (λ5 + λ3) · p2
            λ3 · p1 + λ3 · p2 - (λ5 + λ4) · p3
            λ4 · p1 + λ4 · p3 - (λ61 + λ62) · p4
            λ5 · p3 + λ5 · p4 - (λ71 + λ72 + λ73 + λ74) · p5
          ]
p0 + p1 + p2 + p3 + p4 + p5 = 1
R := rkfixed(p, 0, 1, 15, D)
n := 0...99      t := R<0>
    
```

Рис. 3. Листинг программы в пакете MathCad – решение системы уравнений методом Рунге – Кутты.



Решением системы дифференциальных уравнений будут вероятности функционирования системы (рис.4):

Find(p0,p1,p2,p3,p4,p5)

$$\rightarrow \left[\begin{array}{c} 1 \\ \frac{1 + 14 \cdot t}{22 \cdot t + 1} \\ \frac{(1 + 25 \cdot t + 154 \cdot t^2)}{20 \cdot t + 1} \\ \frac{(1 + 26 \cdot t + 168 \cdot t^2)}{(779 \cdot t^2 + 47 \cdot t + 4268 \cdot t^3 + 1)} \\ \frac{(24024 \cdot t^4 + 7750 \cdot t^3 + 935 \cdot t^2 + 50 \cdot t + 1)}{62 \cdot t + 70224 \cdot t^4 + 1499 \cdot t^2 + 16660 \cdot t^3 + 1} \\ \frac{288288 \cdot t^5 + 117024 \cdot t^4 + 18970 \cdot t^3 + 1535 \cdot t^2 + 62 \cdot t + 1}{7128 \cdot t^3 + 1402 \cdot t^2 + 91 \cdot t + 2} \\ 7t \cdot \frac{7128 \cdot t^3 + 1402 \cdot t^2 + 91 \cdot t + 2}{672672 \cdot t^5 + 241024 \cdot t^4 + 33930 \cdot t^3 + 2335 \cdot t^2 + 78 \cdot t + 1} \end{array} \right]$$

Рис. 4. Фрагмент листинга в пакете MathCad – определение вероятностей функционирования системы.

Таким образом, получим вероятности функционирования системы для частного случая:

$$\begin{aligned} p_0(t) &= \frac{1}{1 + 14 \cdot t}; \\ p_1(t) &= \frac{22 \cdot t + 1}{(1 + 25 \cdot t + 154 \cdot t^2)}; \\ p_2(t) &= \frac{20 \cdot t + 1}{(1 + 26 \cdot t + 168 \cdot t^2)}; \\ p_3(t) &= \frac{(779 \cdot t^2 + 47 \cdot t + 4268 \cdot t^3 + 1)}{(24024 \cdot t^4 + 7750 \cdot t^3 + 935 \cdot t^2 + 50 \cdot t + 1)}; \\ p_4(t) &= \frac{62 \cdot t + 70224 \cdot t^4 + 1499 \cdot t^2 + 16660 \cdot t^3 + 1}{288288 \cdot t^5 + 117024 \cdot t^4 + 18970 \cdot t^3 + 1535 \cdot t^2 + 62 \cdot t + 1}; \\ p_5(t) &= 7t \cdot \frac{7128 \cdot t^3 + 1402 \cdot t^2 + 91 \cdot t + 2}{672672 \cdot t^5 + 241024 \cdot t^4 + 33930 \cdot t^3 + 2335 \cdot t^2 + 78 \cdot t + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

На основании уравнений 4 и рисунка 5 видно, что для каждого уровня системы вероятность отказов минимальна. Если и могут возникнуть отказы системы, то только в нулевом цикле, после чего вероятность отказа на каждом уровне не превышает 10%.

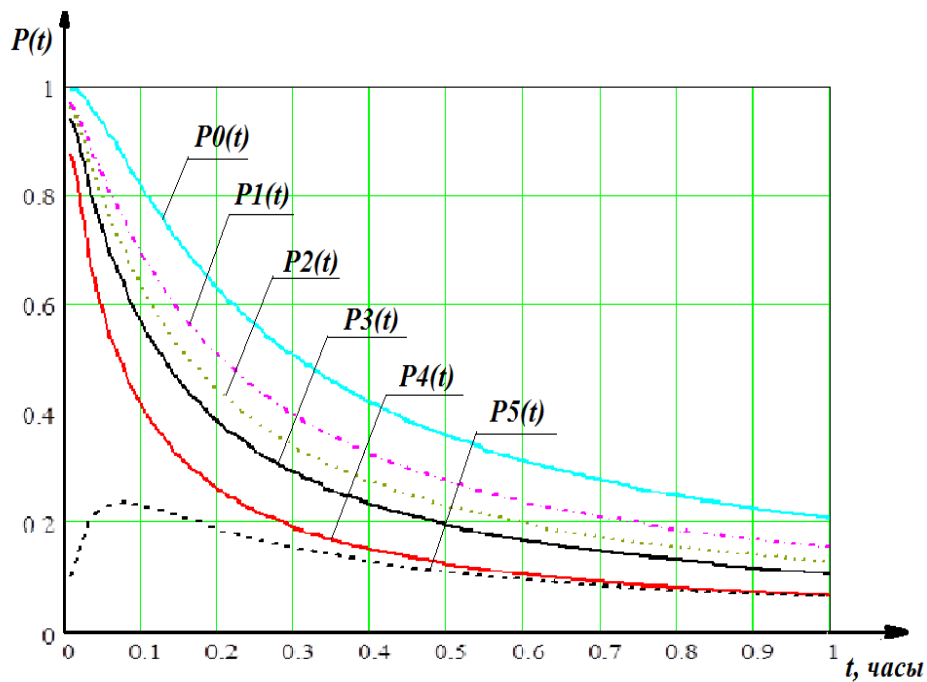


Рис. 5. Вероятности отказов переходного процесса.

t =	$p_0(t) =$	$p_1(t) =$	$p_2(t) =$	$p_3(t) =$	$p_4(t) =$	$p_5(t) =$
0.01	0.877	0.964	0.94	0.969	0.996	0.104
0.06	0.543	0.76	0.695	0.807	0.909	0.235
0.11	0.394	0.609	0.543	0.672	0.796	0.229
0.16	0.309	0.505	0.444	0.571	0.696	0.207
0.21	0.254	0.431	0.375	0.495	0.616	0.186
0.26	0.216	0.375	0.324	0.436	0.55	0.167
0.31	0.187	0.332	0.286	0.389	0.496	0.151
0.36	0.166	0.298	0.255	0.351	0.451	0.138
0.41	0.148	0.27	0.231	0.32	0.414	0.127
0.46	0.134	0.247	0.21	0.294	0.382	0.117
0.51	0.123	0.227	0.193	0.272	0.355	0.109
0.56	0.113	0.21	0.179	0.252	0.331	0.101
0.61	0.105	0.196	0.166	0.236	0.31	0.095
0.66	0.098	0.183	0.155	0.221	0.292	0.089
0.71	0.091	0.172	0.146	0.208	0.275	0.084
0.76	0.086	0.163	0.138	0.197	0.261	0.08

Функция готовности получается суммированием вероятностей $p_i(t)$, соответствующих исправным состояниям системы (рис. 6):

$$K(t) = \sum_{i=0}^5 p_i(t)$$

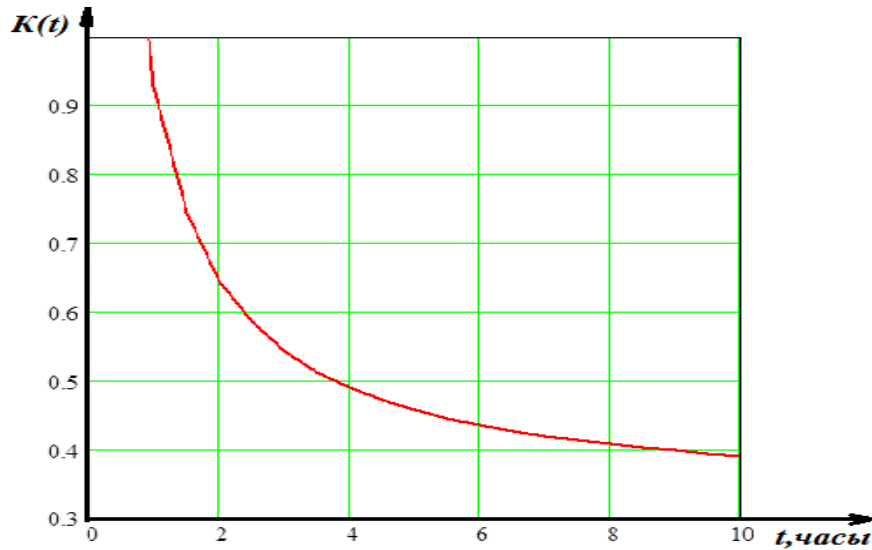


Рис. 6. Функция готовности системы.

Можно сделать вывод, что готовность системы очень высока, т.е. практически с 1 минуты она входит в стационарный режим, дополнительный контроль требуется ближе к 4 часам работы.

Выводы.

1. В результате проведенных исследований и представленных схем функционирования систем определены мероприятия по восстановлению отказавших элементов систем ТО ПУОЗ, позволяющих оптимизировать работу систем за счет сокращения объема отдельных элементов системы и прогнозировать работу отдельных блоков системы.

2. Рассматривая множество всех состояний система ПУОЗ, в том числе множество исправных и отказовых состояний системы ПУОЗ, определены вероятности отказов переходного процесса и функция готовности системы. Это позволит определить область рациональных значений коэффициента использования технических средств.

Литература

1. Михайлов Є. В. Післязбиральна обробка зерна у господарствах півдня України / Є. В. Михайлов.- Мелітополь: Люкс. 2012. - 260 с.
2. Испытания сельскохозяйственной техники // С. В. Кардашевский, Л. В. Погорелый, Г. М. Фудиман, П. И. Лобко, В. В. Брей. - М.: Машиностроение, 1979. - 288 с.
3. Погорелый Л. В. Инженерные методы испытания сельскохозяйственных машин / Л. В. Погорелый. - К.: Техника, 1981. - 185 с.
4. Елизаров В. П. Предприятия послеуборочной обработки и хранения зерна (расчет на ЕОМ) / В. П. Елизаров.- М.: Колос, 1977. - 216 с.
5. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко.- М.: Наука, 1968. – 365 с.



6. *Еникеев В. Г.* Вопросы совершенствования технической оснащенности сельского хозяйства / В. Г. Еникеев // Науч. труды ЛСХИ. - Л., 1976. - Т. 301. - С. 16 - 27.
7. *Пашичев П. Л.* Оценка качества технической оснащенности сельскохозяйственного производства с учетом вероятностных параметров / П. Л. Пашичев // Науч. труды ЛСХИ. - Л., 1980. - Т. 388. - С. 27 - 29.
8. *Лурье А.Б.* Основы теории эффективности функционирования рабочих процессов сельскохозяйственных машин и их систем управления / А. Б. Лурье // Науч. труды ЛСХИ. - Л., 1981. - Т. 415.- С. 3 - 6.
9. *Бусленко В. Н.* Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / В.Н. Бусленко. - М.: Наука, 1977. - 249 с.
10. *Михайлов Є.В.* Методологія обґрунтування складу та функціональних параметрів технічних засобів післязбиральної обробки зерна (на прикладі Юга України): дис...докт. техн. наук/ Є.В. Михайлов. - Мелітополь, 2014 – 413с.
11. *Ермольев Ю.И.* Моделирование процесса функционирования зерноочистительного агрегата / Ю. И. Ермольев, М.Ю. Кочкин // Вестник ДГТУ.2007.- Т.7, №4(35).- С. 407-417.
12. *Журавель В.Ф.* Имитационное моделирование экономических процессов в почвозащитном земледелии [Электронный ресурс] / В.Ф. Журавель // Вестник СКГТУ.- 2006.- №5(9).- Режим доступа: <http://www.ncstu.ru>
13. *Лазарев Ю.* Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебный курс / Ю. Лазарев. - СПб. Питер, 2005. - 512 с.
14. *Манасян С.К.* Имитационное моделирование процессов сушки зерна в зерносушилках сельскохозяйственного назначения: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.20.01 / С.К. Манасян. – Красноярск,2009.- 37с.
15. *Отаров М.Б.* Научные основы разработки адаптивно-имитационных моделей управления сельскохозяйственным производством / М.Б. Отаров // Гуманитарные и социальные науки.- 2007.- №6.- С.45-49.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

Є.В. Михайлов

Анотація - в статті представлено рішення системи диференціальних рівнянь для моделювання процесів функціонування технічних засобів післязбиральної обробки зерна.



THEORETICAL FOUNDATIONS OF MODELING AND EFFICIENT TECHNICAL MEANS OF POST-HARVEST PROCESSING OF GRAIN

E. Mikhailov

Summary

The article presents the solution of differential equations for modeling processes of functioning of the technical means of post-harvest grain.