

**УДК 634.0.30**

**МОДЕЛЬ РАБОТЫ ХАРВАРДЕРА С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ**

**Клоков Д. В., Леонов Е. А.**

*(Белорусский государственный технологический университет)*

*В статье представлена модель работы харвардера с учетом его технических и технологических отказов на различных стадиях работы. Разработанная математическая модель базируется на применении теории массового обслуживания, критериев вероятностей состояний. Разработанная методология позволяет определять: оптимальную продолжительность подачи рабочего органа к растущему дереву, а также оптимальные сроки восстановления работоспособности шасси, двигателя, технологического*

*оборудования, гидравлической системы и системы управления харвардера в условиях его производственной эксплуатации.*

Современные лесные многооперационные машины (харвардеры, харвестеры, форвардеры и др.) представляют собой сложные системы. Установление рациональных параметров их работы обеспечит в дальнейшем эффективность функционирования таких машин [1, 2].

Математическая модель работы харвардера разработана с учетом технических отказов (рис. 1). Для нее характерны следующие состояния:  $S_0$  – машина исправна, но не производит обработку деревьев, сбор, транспортировку, разгрузку и подсортировку сортиментов (совершает холостой ход с погрузочного пункта на пасаку);  $S_1$  – машина исправна, осуществляет валку деревьев, очистку их от сучьев, раскряжевку, сбор сортиментов, их транспортировку, разгрузку и подсортировку на погрузочном пункте;  $S_{21}$  – отказ ходовой части;  $S_{22}$  – отказ двигателя;  $S_{23}$  – отказ технологического оборудования (манипулятора, харвестерной головки);  $S_{24}$  – отказ гидравлической системы;  $S_{25}$  – отказ системы управления.

В такой модели имеют место два типа потоков: древесного сырья и отказов оборудования. Приоритетом пользуется поток отказов, т. к. при их наступлении они «обрабатываются» (ремонт) в первую очередь.

Из свободного состояния  $S_0$  в рабочее  $S_1$  система переходит с интенсивностью  $\lambda_1$  подачи рабочего органа к растущему дереву. Обратный переход осуществляется посредством валки деревьев, очистки их от сучьев, раскряжевки хлыстов на сортименты, сбора, погрузки и транспортировки сортиментов с интенсивностью  $\mu_1$ . При наступлении отказа ходовой части система с интенсивностью  $\lambda_{21}$  перейдет из состояния  $S_1$  в  $S_{21}$ . После выполнения ремонта с темпом  $\mu_{21}$  система вернется в состояние  $S_1$ . Отказ двигателя может привести к переходу в положение  $S_{22}$ , как из состояния  $S_0$ , так и из  $S_1$  с интенсивностью  $\lambda_{22}$ . После ремонта система с темпом  $\mu_{22}$  может перейти как в состояние  $S_0$ , так и в состояние  $S_1$ . Отказ технологического оборудования приведет к переходу в состояние  $S_{23}$  из состояния  $S_1$  с интенсивностью  $\lambda_{23}$ . После ремонта система перейдет из состояния  $S_{23}$  в  $S_1$  с темпом  $\mu_{23}$ . Отказ гидросистемы приведет систему из состояния  $S_1$  в  $S_{24}$  с интенсивностью  $\lambda_{24}$ . После ремонта система перейдет из состояния  $S_{24}$  в  $S_1$  с темпом  $\mu_{24}$ . Отказ системы управления приведет систему из состояния  $S_1$  в  $S_{25}$  с интенсивностью  $\lambda_{25}$ . После ремонта система перейдет из состояния  $S_{25}$  в  $S_1$  с темпом  $\mu_{25}$ .

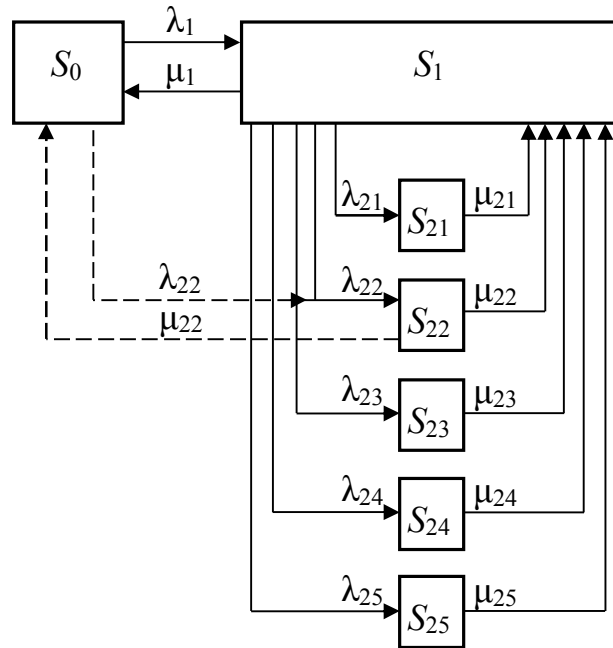


Рисунок 1. Схема состояний системы харвардера

Неизвестные параметры  $\lambda_i$  и  $\mu_i$  устанавливаются следующим образом:  $\lambda_1 = 1/t_{\text{п}}$ , где  $t_{\text{п}}$  – продолжительность времени подачи рабочего органа к растущему дереву;  $\mu_1 = 1/t_{\text{ц}}$ , где  $t_{\text{ц}}$  – продолжительность цикла валки деревьев, очистки их от сучьев, раскряжевки хлыстов на сортименты, сбора, транспортировки, разгрузки и подсортировки сортиментов;  $\lambda_{21} = 1/t_{21}^{\text{от}}$ , где  $t_{21}^{\text{от}}$  – продолжительность времени между отказами шасси;  $\mu_{21} = 1/t_{21}^{\text{в}}$ , где  $t_{21}^{\text{в}}$  – продолжительность времени восстановления работоспособности шасси;  $\lambda_{22} = 1/t_{22}^{\text{от}}$ , где  $t_{22}^{\text{от}}$  – продолжительность времени между отказами двигателя;  $\mu_{22} = 1/t_{22}^{\text{в}}$ , где  $t_{22}^{\text{в}}$  – продолжительность времени восстановления работоспособности двигателя;  $\lambda_{23} = 1/t_{23}^{\text{от}}$ , где  $t_{23}^{\text{от}}$  – продолжительность времени между отказами технологического оборудования;  $\mu_{23} = 1/t_{23}^{\text{в}}$ , где  $t_{23}^{\text{в}}$  – продолжительность времени восстановления работоспособности технологического оборудования;  $\lambda_{24} = 1/t_{24}^{\text{от}}$ , где  $t_{24}^{\text{от}}$  – продолжительность времени между отказами гидравлической системы;  $\mu_{24} = 1/t_{24}^{\text{в}}$ , где  $t_{24}^{\text{в}}$  – продолжительность времени восстановления работоспособности гидравлической системы;  $\lambda_{25} = 1/t_{25}^{\text{от}}$ , где  $t_{25}^{\text{от}}$  – продолжительность времени между отказами системы управления;  $\mu_{25} = 1/t_{25}^{\text{в}}$ , где  $t_{25}^{\text{в}}$  – продолжительность времени восстановления работоспособности системы управления.

Модель функционирования системы будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_{22})P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_{22} P_{22}; \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda_1 P_0 - (\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25})P_1 + \mu_{21} P_{21} + \mu_{22} P_{22} + \mu_{23} P_{23} + \mu_{24} P_{24} + \mu_{25} P_{25}; \\ \frac{dP_{21}}{dt} = \lambda_{21} P_1 - \mu_{21} P_{21}; \\ \frac{dP_{22}}{dt} = \lambda_{22} P_0 + \lambda_{22} P_1 - 2\mu_{22} P_{22}; \\ \frac{dP_{23}}{dt} = \lambda_{23} P_1 - \mu_{23} P_{23}; \\ \frac{dP_{24}}{dt} = \lambda_{24} P_1 - \mu_{24} P_{24}; \\ \frac{dP_{25}}{dt} = \lambda_{25} P_1 - \mu_{25} P_{25}; \\ P_0 + P_1 + P_{21} + P_{22} + P_{23} + P_{24} + P_{25} = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

С учетом того, что моделирование и исследование работы харвардера производится на протяжении длительного промежутка времени (месяц, год и т.д.), значения вероятностей  $P_i$  будут колебаться относительно определенного среднего значения. В этом случае можно допустить, что  $P_0 \approx \text{const}$ ,  $P_1 \approx \text{const}$ ,  $P_{21} \approx \text{const}$ ,  $P_{22} \approx \text{const}$ ,  $P_{23} \approx \text{const}$ ,  $P_{24} \approx \text{const}$ ,  $P_{25} \approx \text{const}$ . Ошибка при принятии данного допущения не превышает 8% [1, 2]. Система дифференциальных уравнений (1) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = -(\lambda_1 + \lambda_{22})P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_{22} P_{22}; \\ 0 = \lambda_1 P_0 - (\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25})P_1 + \mu_{21} P_{21} + \mu_{22} P_{22} + \mu_{23} P_{23} + \mu_{24} P_{24} + \mu_{25} P_{25}; \\ 0 = \lambda_{21} P_1 - \mu_{21} P_{21}; \\ 0 = \lambda_{22} P_0 + \lambda_{22} P_1 - 2\mu_{22} P_{22}; \\ 0 = \lambda_{23} P_1 - \mu_{23} P_{23}; \\ 0 = \lambda_{24} P_1 - \mu_{24} P_{24}; \\ 0 = \lambda_{25} P_1 - \mu_{25} P_{25}; \\ P_0 + P_1 + P_{21} + P_{22} + P_{23} + P_{24} + P_{25} = 1 \end{array} \right. \quad (2)$$

Решив систему уравнений относительно вероятностей состояний  $P_0, P_1, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{24}, P_{25}$ , получим выражения для расчета режимов работы харвардера:

$$P_1 = \frac{\lambda_1 + 0,5\lambda_{22}}{\mu_1 + 0,5\lambda_{22}} P_0; \quad (3)$$

$$P_{21} = \frac{\lambda_{21}(\lambda_1 + 0,5\lambda_{22})}{\mu_{21}(\mu_1 + 0,5\lambda_{22})} P_0; \quad (4)$$

$$P_{22} = \frac{\lambda_{22}}{2\mu_{22}} \left( 1 + \frac{\lambda_1 + 0,5\lambda_{22}}{\mu_1 + 0,5\lambda_{22}} \right) P_0; \quad (5)$$

$$P_{23} = \frac{\lambda_{23}(\lambda_1 + 0,5\lambda_{22})}{\mu_{23}(\mu_1 + 0,5\lambda_{22})} P_0; \quad (6)$$

$$P_{24} = \frac{\lambda_{24}(\lambda_1 + 0,5\lambda_{22})}{\mu_{24}(\mu_1 + 0,5\lambda_{22})} P_0; \quad (7)$$

$$P_{25} = \frac{\lambda_{25}(\lambda_1 + 0,5\lambda_{22})}{\mu_{25}(\mu_1 + 0,5\lambda_{22})} P_0; \quad (8)$$

Примем, что:

$$\frac{\lambda_{21}}{\mu_{21}} = \rho_{21}; \quad \frac{\lambda_{22}}{\mu_{22}} = \rho_{22}; \quad \frac{\lambda_{23}}{\mu_{23}} = \rho_{23}; \quad \frac{\lambda_{24}}{\mu_{24}} = \rho_{24}; \quad \frac{\lambda_{25}}{\mu_{25}} = \rho_{25}; \quad \frac{\lambda_1 + 0,5\lambda_{22}}{\mu_1 + 0,5\lambda_{22}} = \varphi.$$

После подстановки выражений (3)–(8) в последнее уравнение системы (2) получим уравнение для расчета вероятности состояния  $P_0$ :

$$P_0 = [1 + 0,5\rho_{22} + \varphi(1 + \rho_{21} + 0,5\rho_{22} + \rho_{23} + \rho_{24} + \rho_{25})]^{-1}. \quad (9)$$

Подставив в выражения (3) – (7) значения вероятности  $P_0$ , найдем значения вероятностей  $P_1, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{24}, P_{25}$ .

Полученные зависимости вероятностей состояний харвардера позволяют установить рациональные значения параметров машины. Технология работы с зависимостями следующая. На основе технических характеристик принимается ряд параметров, например,  $\mu_1, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}$ , и из построенных зависимостей устанавливаются искомые параметры. Например,  $\lambda_1, \mu_{21}, \mu_{22}, \mu_{23}, \mu_{24}$ , либо  $\mu_{25}$ .

На рис. 2 приведен пример установления одного из названных параметров.

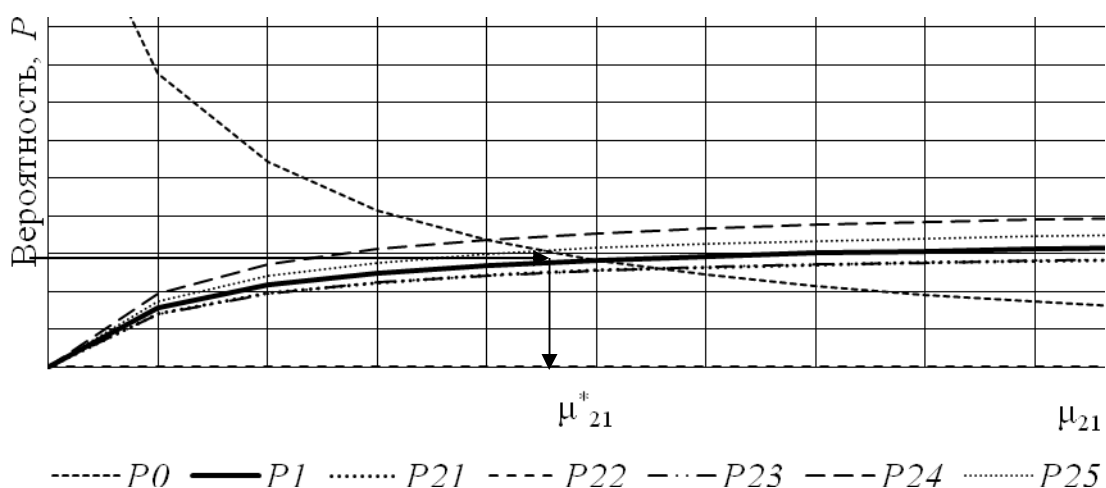


Рисунок 2. Зависимость вероятностей состояний систем харвардера

Установленное рациональное значение  $\mu_{21}^*$  позволяет определить рациональную, в данном случае, продолжительность восстановления ходовой части:

$$t_{21}^* = \frac{1}{\mu_{21}^*}.$$

При этом обеспечивается надлежащая производительность машины, т. к. достигается практически максимальная ее величина  $P_1^*$  (вероятность работы).

Разработанная модель позволяет при заданных характеристиках исследуемого харвардера получать рациональные режимы подачи сырья на обработку и ремонта технологического оборудования в случае технических отказов. Это приведет к росту производительности оборудования без существенных финансовых затрат.

### Список литературы

1. Клоков Д. В., Турлай И. В. Модели работы лесных машин с учетом надежности // Труды БГТУ. 2012. №2: Лесная и деревообработ. пром.-ть. С. 66–67.
2. Клоков Д. В., Турлай И. В. Модель работы харвестера // Труды БГТУ. 2014. №2: Лесная и деревообработ. пром.-ть. С. 77–79.

### Анотація

#### МОДЕЛЬ РОБОТИ ХАРВАРДЕР З УРАХУВАННЯМ НАДІЙНОСТІ

Клоков Д. В., Леонов Е. А.

*У статті представлена модель роботи харвардер з урахуванням його технічних і технологічних відмов на різних стадіях роботи. Розроблена математична модель базується на застосуванні теорії масового обслуговування, критеріїв ймовірностей состояній. Розроблена методологія дозволяє визначити: оптимальну тривалість подачі робочого органу до зростаючого дереву, а також оптимальні терміни відновлення працездатності шасі, двигуна, технологічного обладнання, гідравлічної системи та системи управління харвардер в умовах його виробничої експлуатації.*

### Abstract

#### MODEL OF HARWARDER WORK IN RESPECT OF RELIABILITY

D. V. Klokov, E. A. Leonov

*The article presents a model of harwarder given its technical and technological failures at different stages of work. The mathematical model is based on the application of queuing theory, probability criteria states. The developed methodology allows to determine: the optimal duration of the working body to feed a growing tree, as well as*

*the optimal timing recovery performance chassis, engine, process equipment, hydraulic system and control system harwarder in terms of its manufacturing operation.*

Рецензент: д.т.н., професор

Володин В.И.