

**МОДЕЛЬ РАБОТЫ ЛЕСОВОЗНОГО АВТОПОЕЗДА  
С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ**

**MODEL OF LOGGING TRUCK WORK IN RESPECT  
OF RELIABILITY**

*Клоков Д. В.*, канд. техн. наук, доц.,

Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь;

*Гарабазжу А. А.*, канд. техн. наук, доц.,

*Леонов Е. А.*, канд. техн. наук, доц.,

Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

*D. Klokov*, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus;  
*A. Harabazhyu*, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
*E. Leonov*, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

*В статье представлена модель работы лесовозного автопоезда с учетом его технических и технологических отказов. Разработанная математическая модель базируется на применении теории массового обслуживания, критериев вероятностей состояний. Целью исследований являлось установление рациональных режимов работы лесовозного автопоезда, что позволит повысить эффективность их эксплуатации путем установления оптимальных сроков восстановления работоспособности шасси, двигателя, технологического оборудования и гидравлической системы лесовозного автопоезда в условиях его производственной эксплуатации.*

*Ключевые слова:* модель, лесовозный автопоезд, вероятность, технический отказ, параметры

*The article presents a model of the logging truck based on its technical and technological failures. The developed mathematical model is based*

*on the application of queuing theory, probability criteria states. The purpose of the research was to establish rational modes of operation of the logging truck, which will improve the efficiency of their operation by establishing optimal terms for restoring the chassis, engine, process equipment and hydraulic system of the timber truck in terms of its production operation.*

*Keywords: model, logging truck, probability, technical denial, parameters*

## **Введение**

В настоящее время в Республике Беларусь активно наращиваются объемы заготовки и вывозки древесины. Так в 2018 г. расчетная лесосека по стране составила более 21 млн. м<sup>3</sup> древесного сырья. Особая роль, в этой связи, отводится транспорту, на долю которого приходится около 30–40 % себестоимости заготовки 1 м<sup>3</sup> древесины. На предприятиях системы Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь для обеспечения вывозки заготовленной древесины функционирует более 700 единиц лесовозных автопоездов на базе МАЗ-6303А8, МАЗ-6312В9 и др., от эффективного использования которых в конечном итоге зависит общая эффективность отечественного лесозаготовительного производства.

Для анализа работы различных технических и технологических процессов различных отраслей национальной экономики Республики Беларусь широкое применение получили методы теории массового обслуживания (ТМО). Однако они носят или общий теоретический характер или применяются к сугубо конкретной производственной задаче. В частности, применение ТМО в лесном комплексе, рассматривалось в общем виде в работах [1, 2 и др.]. Анализ и исследование работы лесовозного автопоезда с учетом его технических отказов с применением математических моделей в литературных источниках отсутствуют. Поскольку в настоящее время лесовозный автопоезд является основным видом транспорта, применяемым в лесозаготовительном производстве на внутреннем рынке, актуальной является проблема его эффективного применения.

## Основная часть

Математическая модель для лесовозного автопоезда разработана с учетом возможных его технических отказов. Рассматриваемая модель характеризуется размеченным графом состояний лесовозного автопоезда, представленным на рисунке 1.

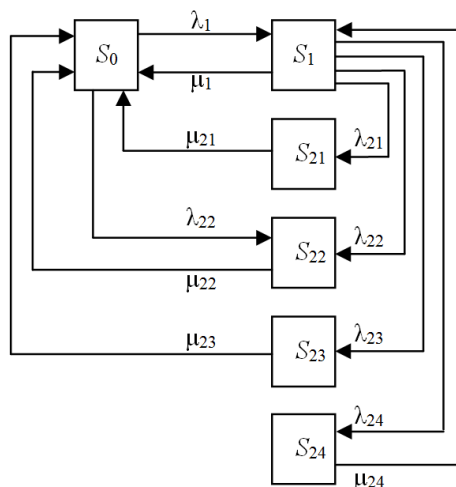


Рисунок 1 – Граф состояний системы «лесовозный автопоезд»

Основными состояниями системы «лесовозный автопоезд» являются:  $S_0$  – лесовозный автопоезд исправен, но не производит погрузку, вывозку и выгрузку сортиментов (простаивает или совершает холостой ход на погрузочный пункт);  $S_1$  – лесовозный автопоезд исправен, осуществляет погрузку, вывозку и выгрузку сортиментов;  $S_{21}$  – отказ ходовой части;  $S_{22}$  – отказ двигателя;  $S_{23}$  – отказ технологического оборудования (манипулятора, грейферного захвата и т.д.);  $S_{24}$  – отказ гидравлической системы.

В рассматриваемой модели имеют место два типа потоков: поток отказов оборудования и поток сортиментов. В качестве приоритетного будем рассматривать поток отказов оборудования, так как при их возникновении они «обслуживаются» в первую очередь (производятся ремонтные работы).

Из свободного состояния  $S_0$  в рабочее  $S_1$  система «лесовозный автопоезд» переходит с интенсивностью  $\lambda_1$  – интенсивностью подачи рабочего органа (гидроманипулятора с грейферным захватом) к штабелю сортиментов на погрузочном пункте. Обратный переход системы осуществляется посредством погрузки и вывозки сортиментов с погрузочного пункта с интенсивностью  $\mu_1$ . При наступлении отказа ходовой части система «лесовозный автопоезд» с интенсивностью  $\lambda_{21}$  перейдет из рабочего состояния  $S_1$  в состояние отказа ходовой части  $S_{21}$ . После выполнения необходимых ремонтных работ с темпом  $\mu_{21}$  система вернется в свободное состояние  $S_0$ . Отказ двигателя может привести к переходу системы в нерабочее положение  $S_{22}$ , как из свободного состояния  $S_0$ , так и из рабочего состояния  $S_1$  с интенсивностью  $\lambda_{22}$ . После выполнения ремонтных работ система с темпом  $\mu_{22}$  перейдет в свободное состояние  $S_0$ . Отказ технологического оборудования приведет к переходу в нерабочее состояние  $S_{23}$  из рабочего состояния  $S_1$  с интенсивностью  $\lambda_{23}$ . После ремонта система перейдет из нерабочего состояния  $S_{23}$  в свободное состояние  $S_0$  с темпом  $\mu_{23}$ . Отказ гидросистемы приведет систему из рабочего состояния  $S_1$  в нерабочее  $S_{24}$  с интенсивностью  $\lambda_{24}$ . После выполнения ремонта система перейдет из нерабочего состояния  $S_{24}$  в рабочее  $S_1$  с темпом  $\mu_{24}$ .

Введем следующие обозначения:

$P_0(t)$  – вероятность того, что в момент времени  $t$  система «лесовозный автопоезд» находится в свободном состоянии  $S_0$ ;

$P_1(t)$  – вероятность того, что в момент времени  $t$  система «лесовозный автопоезд» находится в рабочем состоянии  $S_1$ ;

$P_{2j}(t)$  – вероятность того, что в момент времени  $t$  система «лесовозный автопоезд» находится в состоянии отказа  $j$ -го оборудования  $S_{2j}$ ,  $j = 1, 2, 3, 4$ .

Тогда модель функционирования рассматриваемой системы может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний:

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

Неизвестные параметры  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$ ,  $\lambda_{2j}$  и  $\mu_{2j}$  устанавливаются следующим образом:

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_{\text{п}}}, \quad (2) \quad \mu_{21} = \frac{1}{t_{21}^{\text{B}}}, \quad (5)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{t_{\text{ц}}}, \quad (3) \quad \lambda_{22} = \frac{1}{t_{22}^{\text{OT}}}, \quad (6)$$

$$\lambda_{21} = \frac{1}{t_{21}^{\text{OT}}}, \quad (4) \quad \mu_{22} = \frac{1}{t_{22}^{\text{B}}}, \quad (7)$$

$$\lambda_{23} = \frac{1}{t_{23}^{\text{OT}}}, \quad (8) \quad \lambda_{24} = \frac{1}{t_{24}^{\text{OT}}}, \quad (10)$$

$$\mu_{23} = \frac{1}{t_{23}^{\text{B}}}, \quad (9) \quad \mu_{24} = \frac{1}{t_{24}^{\text{B}}}, \quad (11)$$

где  $t_{\text{п}}$  – продолжительность времени подачи рабочего органа к штабелю сортименту;  $t_{\text{ц}}$  – продолжительность цикла погрузки, вывозки и выгрузки сортиментов;  $t_{21}^{\text{OT}}$  – продолжительность времени между отказами шасси;  $t_{21}^{\text{B}}$  – продолжительность времени восстановления работоспособности шасси;  $t_{22}^{\text{OT}}$  – продолжительность времени между

отказами двигателя;  $t_{22}^B$  – продолжительность времени восстановления работоспособности двигателя;  $t_{23}^{OT}$  – продолжительность времени между отказами технологического оборудования;  $t_{23}^B$  – продолжительность времени восстановления работоспособности технологического оборудования;  $t_{24}^{OT}$  – продолжительность времени между отказами гидравлической системы;  $t_{24}^B$  – продолжительность времени восстановления работоспособности гидравлической системы.

При исследовании функционирования системы «лесовозный автопоезд» в условиях установившегося режима – работы на протяжении длительного промежутка времени (месяц, год и т.д.) – можно считать, что вероятности  $P_0(t) = \text{const}$ ,  $P_1(t) = \text{const}$ ,  $P_{21}(t) = \text{const}$ ,  $P_{22}(t) = \text{const}$ ,  $P_{23}(t) = \text{const}$ ,  $P_{24}(t) = \text{const}$  и являются финальными вероятностями состояния системы. При данном допущении ошибка, как правило, не превышает 8% [2, 3].

В этом случае система дифференциальных уравнений Колмогорова (1), описывающая вероятностные состояния системы «лесовозный автопоезд» преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений, имеющую вид:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_1 + \lambda_{22})P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_{21} P_{21} + \mu_{22} P_{22} + \mu_{23} P_{23}; \\ 0 = \lambda_1 P_0 - (\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_1 + \mu_{24} P_{24}; \\ 0 = \lambda_{21} P_1 - \mu_{21} P_{21}; \\ 0 = \lambda_{22} P_0 + \lambda_{22} P_1 - \mu_{22} P_{22}; \\ 0 = \lambda_{23} P_1 - \mu_{23} P_{23}; \\ 0 = \lambda_{24} P_1 - \mu_{24} P_{24}; \\ P_0 + P_1 + P_{21} + P_{22} + P_{23} + P_{24} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

Решая рассматриваемую систему алгебраических уравнений относительно вероятностей состояний  $P_0, P_1, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{24}$ , получим выражения для расчета режимов работы лесовозного автопоезда:

$$P_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23}} P_0; \quad (13)$$

$$P_{21} = \frac{\lambda_{21} \lambda_1}{\mu_{21} (\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23})} P_0; \quad (14)$$

$$P_{22} = \frac{\lambda_{22}}{\mu_{22}} \left( 1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23}} \right) P_0; \quad (15)$$

$$P_{23} = \frac{\lambda_{23}\lambda_1}{\mu_{23}(\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23})} P_0; \quad (16)$$

$$P_{24} = \frac{\lambda_{24}\lambda_1}{\mu_{24}(\mu_1 + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23})} P_0. \quad (17)$$

Введем следующие обозначения:

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

Тогда получим расчетное выражение для определения вероятности нахождения системы «лесовозный автопоезд» в свободном состоянии  $P_0$ :

$$P_0 = [1 + \rho_{22} + \varphi(1 + \rho_{21} + \rho_{22} + \rho_{23} + \rho_{24})]^{-1}. \quad (18)$$

Подставив в выражения (13)–(17) значения вероятности  $P_0$ , найдем значения исследуемых вероятностей  $P_1, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{24}$ .

Полученные зависимости вероятностей состояний лесовозного автопоезда позволяют установить рациональные значения параметров машины. Технология работы с зависимостями следующая. На основе технических характеристик принимается ряд параметров, например,  $\mu_1, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}$  и из построенных зависимостей устанавливаются искомые параметры. Например,  $\lambda_1, \mu_{21}, \mu_{22}, \mu_{23}$  либо  $\mu_{24}$  [2–5].

На рисунке 2 приведен пример установления одного из рассматриваемых параметров.

Оптимальное значение интенсивности ремонтных работ по восстановлению ходовой части лесовозного автопоезда  $\mu_{21}^*$ , определяемых по рис. 2, позволяет определить рациональную продолжительность восстановления ходовой части:

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

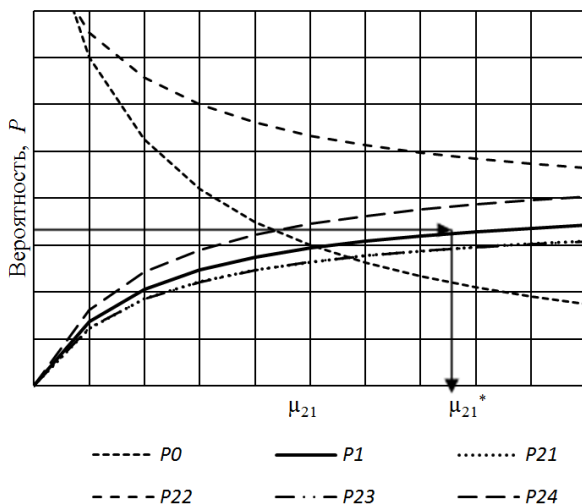


Рис. 2 – Зависимости вероятностей состояний системы «лесовозный автопоезд»

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

## Выводы

Разработанная математическая модель функционирования системы «лесовозный автопоезд» позволяет определять рациональные режимы работы и ремонта технологического оборудования сортиментовоза на операции вывозки древесного сырья с погрузочного пункта в случае возможных технических отказов при заданных характеристиках. Это приведет к росту производительности лесопромышленного оборудования без существенных финансовых затрат.

## Литература

1. Игнатенко, В. В. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок: учеб. пособие для студентов специальности «Лесоинженерное дело» [Текст] / В.В. Игнатенко, И.В. Турлай, А.С. Федоренчик. – Минск: БГТУ, 2004. – 180 с.



2. Леонов Е. А. Математическая модель работы рубильной машины с учетом ее технических отказов [Текст] / Е.А. Леонов, В.В. Игнатенко, Д.В. Клоков // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревооб. промышленность. С. 40–44.
3. Клоков, Д. В. Модель работы форвардера с учетом надежности [Текст] / Д. В. Клоков, Е. А. Леонов, И. В. Турлай // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревооб. промышленность. С. 23–26.
4. Клоков, Д.В. Модель работы форвардера с учетом надежности [Текст] / Д.В. Клоков, Е.А. Леонов // Сборник научных статей «Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П. Василенко» – Харьков, 2015. № 160. С. 159–164.
5. Клоков, Д. В. Модель работы харвестера [Текст] / Д.В. Клоков, И.В. Турлай // Труды БГТУ. 2014. №2: Лесная и деревооб. промышленность. С. 77–79.
6. Клоков, Д. В. Модели работы лесных машин с учетом надежности [Текст] / Д.В. Клоков, И.В. Турлай // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревооб. пром-ть. С. 66–67.
7. Федоренчик, А. С. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ: учеб.-метод. пособие [Текст] / А.С. Федоренчик, Д.В. Клоков, Е.А. Леонов. – Минск: БГТУ, 2016. – 204 с.
8. Матвейко, А. П. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Практикум [Текст] / А.П. Матвейко, Д.В. Клоков, П.А. Протас. – Минск: БГТУ, 2013. – 197 с.
9. Игнатенко, В. В. Установление рациональных параметров многооперационных машин в лесозаготовительной промышленности [Текст] / В.В. Игнатенко, Е.А. Леонов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 5–4 (16–4). С. 291–295.
10. Клоков, Д. В. Оборудование лесопромышленных предприятий. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие [Текст] / Д. В. Клоков, И.В. Турлай, Е.А. Леонов. – Минск: БГТУ, 2015. – 200 с.
11. Технология и оборудование комплексного использования древесного сырья. Практикум [Текст] / А.С. Федоренчик, С.П. Мохов, Д.В. Клоков, Е.А. Леонов. Минск: БГТУ, 2014. 274 с.

12. Федоренчик, А. С. Энергетическое использование древесной биомассы. Практикум: учеб. пособие [Текст] / А. С. Федоренчик, Д.В. Клоков, Е.А. Леонов. – Минск: БГТУ, 2015. – 212 с.

13. Леонов Е.А. Устойчивое снабжение энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов [Текст] // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 2. С. 17–19.

14. Леонов, Е. А. Обоснование межоперационных запасов сырья на лесоэнергетических терминалах с учетом загрузки основного технологического оборудования [Текст] / Е.А. Леонов, Д.В. Клоков // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2 (198). – С. 232–237.

15. Ермалицкий, А. А. Особенности эксплуатации фронтальных лесопогрузчиков при проведении подготовительных работ по строительству лесных дорог [Текст] / А.А. Ермалицкий, Д.В. Клоков, А.И. Хотянович // Автомобильные дороги и мосты. – 2014. – № 2. – С. 103–107.

16. Леонов, Е. А. Теоретическое исследование влияния вместимости ЛЭТ на загрузку технологического оборудования [Текст] / Е.А. Леонов, Д.В. Клоков // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы международной научно-технической конференции, Минск, 26–28 апреля 2017. – Минск: БГТУ, 2017. – С. 96–100.