

УДК 621.311

СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ КРАНОВ С ИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Басманов В.Г., Холманских В.М.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия (610000, Киров, ул. Московская, 36), e-mail: kaf_eps@vyatsu.ru

Публикация посвящена исследованию влияния надежности кранового электрооборудования на производительность кранов при допущении абсолютной надежности механической системы. Технологические операции погрузки и штабелёвки лесоматериалов обладают свойствами простейшего пуассоновского потока. Аналогичными свойствами обладают потоки отказов и восстановлений кранового электрооборудования, т.е. функционирование кранового электрооборудования в совокупности с технологическим процессом погрузки и штабелёвки можно представить в виде системы массового обслуживания с восстановлением. Предлагается теоретическая зависимость, которая позволяет устанавливать связь между коэффициентом готовности и производительностью крана с одновременным учетом интенсивностей работы крана и отказов его электрооборудования. Получены теоретические выражения, которые можно использовать для расчета комплексных показателей надежности кранового электрооборудования – коэффициента технической готовности и коэффициента простоя через коэффициенты загрузки крана отказами конкретных элементов электрооборудования.

Ключевые слова: надежность, крановое электрооборудование, комплексные показатели, поток, отказ, восстановление, граф, система, технологический процесс, коэффициент, вероятность, интенсивность.

RELATION OF PARAMETERS OF RELIABILITY ELECTRICAL EQUIPMENT OF CRANES WITH THEIR PRODUCTIVITY AT THE ENTERPRISES OF TIMBER INDUSTRY COMPLEX

Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M.

Federal State budget institution of higher education "Vyatka State University", Kirov, Russia (610000, Kirov, Moskovskaya Street, 36), e-mail: kaf_eps@vyatsu.ru

The publication is devoted to research of influence of reliability crane electric equipment on productiveness cranes in assuming absolute reliability of the mechanical system. Technological operations of loading and stowage timber have the properties of a simplest Poisson flow. Similar properties have streams of failures and restoring electric equipment of cranes, i.e. the functioning electric equipment of crane in combination with the technological process of loading and stowage can be represented as a system of mass service with restoring. Is proposed a theoretical dependence, which allows you to establish a link between factor the readiness and productivity of the crane simultaneous while taking into account the intensity of work of the crane and the refusals of its electrical equipment. Were proposed the theoretical expressions that can be used to calculate complex parameters of reliability electric equipment of crane – technical readiness coefficient and coefficient of downtime through coefficients load crane denials specific elements of electrical equipment.

Keywords: reliability, crane electrical equipment, complex parameters, stream, failure, restoring, graph, system, technological process, coefficient, probability, intensity.

Эффективность использования кранов на лесных нижних складах зависит от интенсивности поступления лесоматериалов на погрузку или штабелёвку и интенсивностей отказов и восстановлений электрической и механической систем кранов. В [3] показано, что на отказы электрооборудования кранов приходится более 81 % от всех отказов. Принимая во внимание этот факт, исследуем влияние надежности кранового электрооборудования на производительность кранов при допущении абсолютной надежности механической системы.

Эксплуатации кранов на погрузочно-штабелёвочных работах присущи определённые закономерности, основными из которых являются:

1. Существующая технология не обеспечивает кранам строго фиксированного положения.
2. Во время выполнения технологических операций у кранов в случайные нефиксированные моменты времени возникают отказы электрооборудования, длительность устранения которых является случайной величиной.
3. Операции погрузки и штабелёвки повторяются большое число раз.
4. Предметы труда – разнообразные лесоматериалы поступают на погрузку и штабелёвку в случайные моменты времени, имеют разные габариты (объём и линейные размеры), распределённые по вероятностным законам, что вызывает случайную длительность занятости кранов по времени.

Указанные закономерности при эксплуатации кранов позволяют сделать вывод о том, что процесс функционирования кранов на лесных складах представляет собой одну из лесозаготовительных систем, обеспечивающую выполнение погрузочно-штабелёвочных работ.

Технологический поток на нижнем складе в целом представляет собой совокупность разнообразных операций, основными из которых являются: разгрузка, обрезка сучьев, раскряжёвка, окорка, сортировка, погрузка в железнодорожные вагоны и штабелёвка.

Рассматриваемые нами технологические операции погрузки и штабелёвки лесоматериалов обладают свойствами простейшего пуассоновского потока [2]. Аналогичными свойствами обладают потоки отказов и восстановлений кранового электрооборудования [4].

Таким образом, функционирование кранового электрооборудования в совокупности с технологическим процессом погрузки и штабелёвки можно представить в виде системы массового обслуживания с восстановлением.

На рис.1 представлен граф состояний системы в виде возможных состояний кранового электрооборудования в технологическом потоке погрузки и штабелёвки лесоматериалов.

Для нестационарного пуассоновского потока интенсивности λ и μ зависят от времени. В случае простейшего пуассоновского потока применительно к исследуемому процессу (см. рис. 1) параметры λ и μ определяются по формулам:

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_1}; \mu_1 = \frac{1}{t_1'}; \lambda_2 = \frac{1}{t_2}; \mu_2 = \frac{1}{t_2'},$$

где t_1 – среднее время между поступлениями лесоматериалов на погрузку и штабелёвку;

t_1' – среднее время обработки (погрузки и штабелёвки) единицы объёма лесоматериалов;

t_2 – среднее значение наработки между отказами кранового электрооборудования;

t_2' – среднее значение времени восстановления работоспособности при отказе кранового электрооборудования.

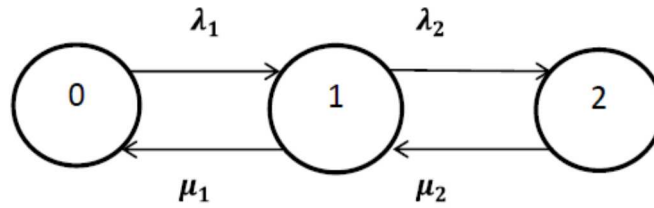


Рис.1. Граф состояний системы:

0 – свободное состояние, кран исправен и свободен; 1 – рабочее состояние, кран исправен и занят выполнением погрузочно-штабелёвочных работ; 2 – состояние ремонта электрооборудования, отказ наступил во время нахождения крана в рабочем состоянии; λ_1 – интенсивность поступления лесоматериалов на погрузку и штабелёвку; μ_1 – интенсивность погрузки и штабелёвки единицы объёма лесоматериалов; λ_2 – интенсивность отказов кранового оборудования; μ_2 – интенсивность восстановления работоспособности электрооборудования после отказа.

Из рис.1 видно, что в кран поступает два вида заявок – на обслуживание лесоматериалов (погрузка и штабелёвка) и на ремонт электрооборудования (устранение отказов). Будем считать, что погрузка и штабелёвка лесоматериалов при наступлении отказа прекращается и возобновляется сразу же после восстановления работоспособности электрооборудования, устранение неисправности выполняется немедленно после её возникновения.

Согласно графа состояний системы в определённый момент времени кран находится в одном из трёх возможных состояний – 0, 1, 2. Обозначим вероятность нахождения крана в свободном состоянии через $P_0(t)$, в рабочем состоянии – $P_1(t)$, в неисправном состоянии – $P_2(t)$.

Выразив вероятности возможных состояний дифференциальными уравнениями для марковского случайного процесса:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda_1 P_0(t) + \mu_1 P_1(t), \\ P_1'(t) = \lambda_1 P_0(t) - (\lambda_2 + \mu_1) P_1(t) + \mu_2 P_2(t), \\ P_2'(t) = \lambda_2 P_1(t) - \mu_2 P_2(t). \end{cases} \quad (1)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений определим начальные условия (электрооборудование исправно и кран находится в свободном состоянии).

$$t = 0; P_0(t) = 1; P_1(t) = P_2(t) = 0.$$

Решение системы (1) получим для установившегося режима при $t \rightarrow \infty$.

Потоки поступления лесоматериалов на обработку, потоки отказов и восстановлений электрооборудования простейшие. Тогда имеем

$$P_0'(t) = P_1'(t) = P_2'(t) = 0.$$

В этом случае система дифференциальных уравнений (1) трансформируется в систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 P_0 + \mu_1 P_1, \\ 0 = \lambda_1 P_0 - (\lambda_2 + \mu_1) P_1 + \mu_2 P_2, \\ 0 = \lambda_2 P_1 - \mu_2 P_2. \end{cases} \quad (2)$$

Для решения системы (2) необходимо добавить нормировочное уравнение:

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1.$$

Решая (2) относительно вероятностей возможных состояний, получим

$$P_0 = \frac{\mu_1 \mu_2}{E}; \quad P_1 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{E}; \quad P_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{E}, \quad (3)$$

где $E = \lambda_1 \mu_2 + \mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \lambda_2$.

Введём относительные величины a_1 и a_2 , где $a_1 = \lambda_1 / \mu_1$ – коэффициент загрузки крана, лесоматериалами, поступающими на погрузку и штабелевку; $a_2 = \lambda_2 / \mu_2$ – коэффициент загрузки крана отказами электрооборудования в рабочем состоянии.

Тогда вероятности возможных состояний крана определяются выражениями:

$$P_0 = \frac{1}{F}; \quad P_1 = \frac{a_1}{F}; \quad P_2 = \frac{a_1 a_2}{F}, \quad (4)$$

где $F = 1 + a_1 + a_1 a_2$.

Согласно [1] для характеристики надёжности ремонтируемых в процессе применения объектов, у которых в течение заданного времени допускаются отказы, используется коэффициент технической готовности K_T . В данном случае для кранового электрооборудования K_T определится выражением

$$\hat{E}_{\bar{A}} = \frac{t_2}{t_2 + t_2'}. \quad (5)$$

Учитывая, что $t_2 = 1/\lambda_2$, $t_2' = 1/\mu_2$ выражение (4) запишем в виде

$$\hat{E}_{\bar{A}} = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}. \quad (6)$$

Коэффициент загрузки крана отказами электрооборудования в рабочем состоянии a_2 связан с K_T уравнением

$$a_2 = \frac{1 - \hat{E}_{\bar{A}}}{\hat{E}_{\bar{A}}}. \quad (7)$$

Выведем зависимость относительной производительности крана в единицу времени от надёжности его электрооборудования в виде функции $\Pi/\Pi_{\text{пр}} = f(K_T)$ для случая бесперебойного обеспечения крана лесоматериалами, поступающими на погрузку и штабелевку. Здесь $\Pi_{\text{пр}}$ – проектная производительность крана при паспортном режиме эксплуатации.

Относительная производительность крана $\Pi/\Pi_{\text{пр}}$ выразится произведением интенсивности поступления лесоматериалов на погрузку и штабелевку λ_1 на вероятность нахождения кранового электрооборудования в рабочем состоянии P_1 .

$$\dot{I}/\dot{I}_{\text{пр}} = \lambda_1 P_1. \quad (8)$$

Подставим в (8) значение P_1 из (4)

$$\dot{I}/\dot{I}_{\text{пр}} = \lambda_1 \frac{a_1}{F} = \frac{\lambda_1 a_1}{1 + a_1 + a_1 a_2}. \quad (9)$$

Выражение для $\Pi/\Pi_{\text{пр}}$ при установившемся режиме погрузочно-штабелёвочных работ, когда $\lambda_1 = \mu_1$, примет вид

$$\dot{I}/\dot{I}_{\text{пр}} = \frac{\lambda_1}{2 + a_2} = \frac{\mu_1}{2 + a_2}. \quad (10)$$

Подставим в (10) значение a_2 из (7) в результате получим зависимость производительности крана в единицу времени от коэффициента технической готовности кранового электрооборудования.

$$\dot{I}/\dot{I}_{\text{пр}} = \frac{\mu_1 K_{\bar{A}}}{K_{\bar{A}} + 1}. \quad (11)$$

Полученное выражение не учитывает снижение K_T из-за вполне возможного увеличения интенсивности эксплуатации крана выше допустимой (паспортной). Часто такая ситуация возникает при работе крана с грейферными механизмами [5]. В работе [6] показано, что главным фактором, влияющим на надёжность крановых электродвигателей, является превышение паспортных режимов работы кранового электрооборудования по числу включений в час (h) и продолжительности включения (ПВ). Это всегда наблюдается при $\mu_1 > \mu_{\text{пр}}$, где $\mu_{\text{пр}}$ – проектная интенсивность погрузки и штабелевки лесоматериалов, при которой ПВ и h соответствуют паспортным значениям электрооборудования.

Зависимости $\hat{E}_{\bar{A}} = f(\mu_1/\mu_{\text{пр}})$ при работе крана с различными грузозахватными приспособлениями и на разных погрузочно-разгрузочных операциях можно получить только ме-

тодом наблюдений, реализация которого связана с большими организационными проблемами в производственных условиях.

На данном этапе исследования эту зависимость в выражении (11) можно учесть величиной суммы двух коэффициентов $-(\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2)$, где $\tilde{n}_1 = \mu_1 / \mu_{\text{ред}}$ – коэффициент относительной интенсивности отказов, зависящий от фактических режимов работы крана, $\tilde{n}_2 = \lambda_2 / \lambda_0$ – коэффициент относительной интенсивности отказов, зависящий от влияния на надежность электрооборудования оставшихся эксплуатационных факторов, λ_0 – интенсивность отказов кранового электрооборудования при номинальных показателях качества электрической энергии, своевременном выполнении ППР, соблюдении технологии ремонта электрооборудования, работе на кранах квалифицированного персонала.

Тогда формула (11) принимает окончательный вид

$$\dot{I} / \dot{I}_{\text{н}} = \frac{(\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2) K_{\bar{A}}}{K_{\bar{A}} + 1}. \quad (12)$$

При нормальной эксплуатации $\tilde{n}_1 = \tilde{n}_2 = 1$. На рис. 2 изображены зависимости при разных значениях $(\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2)$.

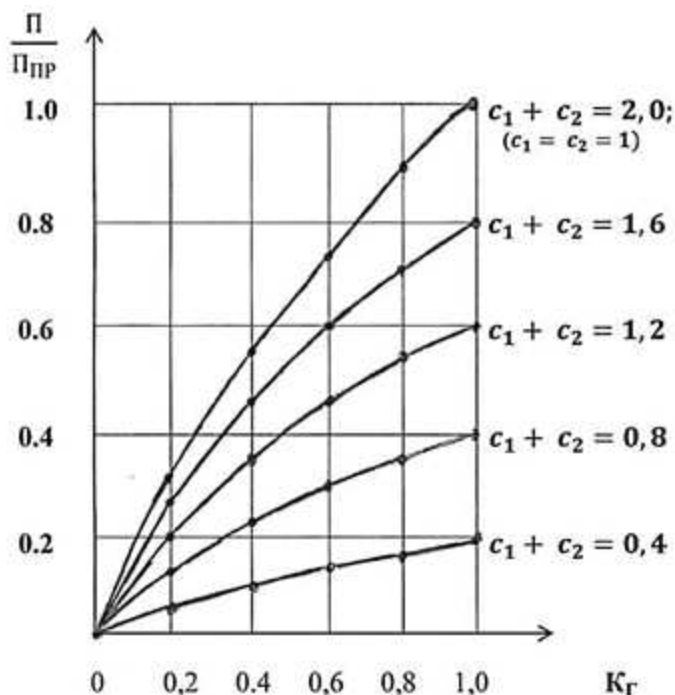


Рис. 2. Зависимость $\frac{P}{P_{\text{ПР}}} = f(K_{\text{Г}})$ при разных значениях $(\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2)$

Предлагаемая теоретическая зависимость позволяет устанавливать связь между коэффициентом готовности и производительностью крана с одновременным учетом интенсивностей работы крана и отказов его электрооборудования.

Расчет K_T при $\Pi = \Pi_{ПР}$ в зависимости от показателей надежности элементов кранового электрооборудования можно выполнить, рассмотрев два вида потоков событий – потоки отказов и потоки восстановлений.

Для этого рассмотрим крановое электрооборудование как систему массового обслуживания и изобразим ее в виде ветвящегося графа состояний (см. рис. 3).

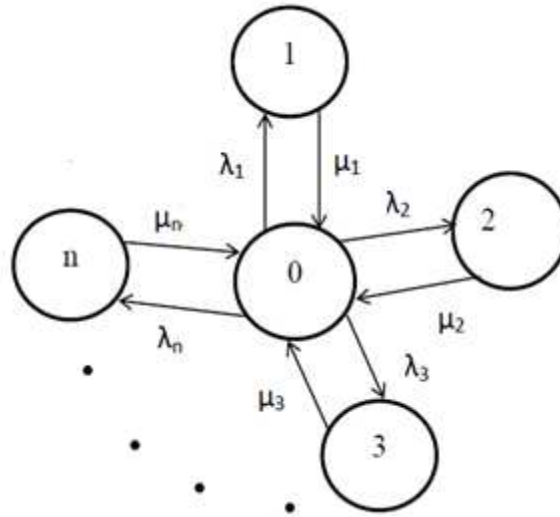


Рис. 3. Граф состояний системы кранового электрооборудования:

n – число элементов электрооборудования, $\lambda_i = 1/t_{2i}$ – интенсивность отказов i -го элемента, $\mu_i = 1/t'_{2i}$ – интенсивность восстановления i -го элемента, t_{2i} – среднее значение наработки между отказами i -го элемента, t'_{2i} – среднее значение времени восстановления i -го элемента.

Согласно графа состояний системы в определённый момент времени кран находится в одном из $n+1$ возможных состояний — $0, 1, \dots, n$. Обозначим вероятность нахождения крана в исправном состоянии через $P_0(t)$ и в неисправном состоянии – $P_i(t)$, где $i = 1, 2, \dots, n$.

Выразим вероятности возможных состояний дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t) + \dots + \mu_n P_n(t), \\ P'_1(t) = \lambda_1 P_0(t) - \mu_1 P_1(t), \\ P'_2(t) = \lambda_2 P_0(t) - \mu_2 P_2(t), \\ \vdots \\ P'_n(t) = \lambda_n P_0(t) - \mu_n P_n(t). \end{cases} \quad (13)$$

Рассмотрим установившийся процесс эксплуатации ($t \rightarrow \infty$). Потоки отказов и восстановлений электрооборудования простейшие. Тогда имеем

$$P_0'(t) = P_1'(t) = P_2'(t) = P_n'(t) = 0.$$

В этом случае система дифференциальных уравнений (1) переходит в систему линейных алгебраических уравнений, для решения которой добавлено нормировочное уравнение:

$$P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1. \quad (14)$$

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \dots + \mu_n P_n, \\ 0 = \lambda_1 P_0 - \mu_1 P_1, \\ 0 = \lambda_2 P_0 - \mu_2 P_2, \\ \vdots \\ 0 = \lambda_n P_0 - \mu_n P_n, \\ P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1. \end{cases} \quad (15)$$

Решение системы имеет вид:

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} + \dots + \frac{\lambda_n}{\mu_n}}, \\ P_1 &= P_0 \frac{\lambda_1}{\mu_1}, \\ P_2 &= P_0 \frac{\lambda_2}{\mu_2}, \\ &\vdots \\ P_n &= P_0 \frac{\lambda_n}{\mu_n}. \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициент готовности системы равен сумме всех вероятностей исправных состояний системы. В данном случае $K_G = P_0$. Используя коэффициенты загрузки крана отказами элементов электрооборудования, получим:

$$\hat{E}_A = \frac{1}{1 + \sum_1^n a_i}, \quad (17)$$

где $a_i = \lambda_i / \mu_i$ – коэффициент загрузки крана отказами i -го кранового электрооборудования.

Коэффициент простоя системы равен сумме всех вероятностей неисправных состояний системы $\hat{E}_I = \sum_1^n P_i$. Выражая K_{II} через коэффициенты загрузки крана отказами имеем:

$$\hat{E}_i = \frac{\sum_1^n a_i}{1 + \sum_1^n a_i}. \quad (18)$$

Таким образом, предлагаемая теоретическая зависимость (12) позволяет устанавливать связь между коэффициентом готовности кранового электрооборудования и производительностью крана с одновременным учетом интенсивностей работы крана и отказов его электрооборудования.

Полученные теоретические выражения (17 и 18) можно использовать для расчета комплексных показателей надежности кранового электрооборудования – коэффициента технической готовности и коэффициента простоя через коэффициенты загрузки крана отказами конкретных элементов электрооборудования.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. [Электронный ресурс]: Прин. 01.07.1990, восст. действ. с 01.12.2012. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – Доступ из нормативно-технич. системы «Техэксперт». С.27.
2. Редькин А. К. Исследование штабелевочно-погрузочных работ на нижних лесных складах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1966. – 24 с.
3. Холманских В.М. К вопросу выбора объектов и определения задач исследования надежности электрооборудования специализированных кранов // Научные труды МЛТИ. – 1977. – Вып. 98. – С.172-176.
4. Холманских В.М. Исследование потоков отказов электрооборудования погрузочно-штабелевочных кранов // Лесной журнал. – 1980. – № 6. – С.89-93.
5. Холманских В.М. Режимы работы электроприводов кранов на лесных складах // Научные труды МЛТИ. – 1976. – Вып. 78. – С.113-119.
6. Холманских В.М. Математическая модель эксплуатационной надежности электродвигателей кранов на предприятиях лесопромышленного комплекса // Общество, наука, инновации: сборник материалов Всерос. ежегодн. научно-практическая конференция (НПК-2013), (Киров 15-26 апр. 2013 г.). Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2013). – Киров, 2013. – С.2114-2117.

Рецензенты:

Черепанов В.В., д.т.н., профессор кафедры электроснабжения ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.

Красных А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электротехники и электроники ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.