УДК 658.581.001.57

В.Н. Шиловский

Шиловский Вениамин Николаевич родился в 1945 г., окончил в 1970 г. Петрозаводский государственный университет, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта ПГУ. Имеет более 140 печатных трудов в области надежности и ремонта лесных машин.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН ПЕРЕДВИЖНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Представлена математическая модель оценки эффективности организации технического обслуживания и ремонта лесозаготовительных машин передвижными мастерскими.

лесозаготовительные машины, обслуживание, математическая модель.

Техническое обслуживание и ремонт лесозаготовительных машин могут быть организованы на стационарных объектах системы технического сервиса и передвижными мобильными мастерскими типа ЛВ-8Б. Выбор стратегии зависит от вида услуг и территориального распределения потребителей. Как стационарные, так и передвижные пункты технического обслуживания организуются заводами-изготовителями машин, представляют собой дилерские пункты или объекты ремонтно-обслуживающей базы лесозаготовительных предприятий.

В качестве математической модели, описывающей поведение системы передвижная мастерская – территориально-распределенный потребитель (мастерский участок, лесопункт, леспромхоз), можно использовать модели системы массового обслуживания, а именно марковского процесса, когда вероятность будущего состояния системы зависит от ее состояния только в настоящий момент времени, но не в прошлом. Система совершает переход из одного состояния в другое, если описывающие ее переменные изменяются от значений, задающих одно состояние, до определяющих другое.

Марковский процесс называется процессом с дискретным состоянием, если переход системы из одного состояния в другое совершается скачком, мгновенно. Такие марковские системы изображаются графом состояния [1].

Рассмотрим функционирование системы передвижная мастерская (ПМ) – территориально-распределительный потребитель (ТРП) в режиме поочередного выполнения передвижными средствами у потребителей одних и тех же видов технических воздействий.

Лесозаготовительные машины в гарантийный период эксплуатации могут средствами лесозаготовительного предприятия доставляться с мастерских участков на объекты ремонтно-обслуживающей базы соответствующих лесопунктов (ЛЗП) и там обслуживаться передвижными средствами завода-изготовителя или по договору с ним средствами дилерского пункта.

Лесозаготовительные машины находятся на одном из i-х ЛЗП (i = 1, 2, 3, …, n) на территории одного или нескольких лесозаготовительных предприятий. В дискретные моменты времени $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < \ldots < t_k$ передвижная мастерская шаг за шагом совершает переходы: $\omega_0 \to \omega_1 \to \omega_2 \to \to \omega_3 \to \ldots \to \omega_k$, где $\omega_k = \omega(\tau_k)$ – состояние системы через k шагов ($k = n + 1$); t_0 – момент начального состояния системы (начало смены ПМ); $n + 1$ – число возможных перемещений (состояний) ПМ. Вероятность события, состоящего в том, что ПМ в момент времени t находится в состоянии x_i, обозначим как $P_i(t) = P[x(t) = x_i]$.

В зависимости от объема технических воздействий в i-м ЛЗП и удаленности от места дислокации ПМ функционирование передвижного средства обслуживания протекает по следующим вариантам (рис. 1, 2).

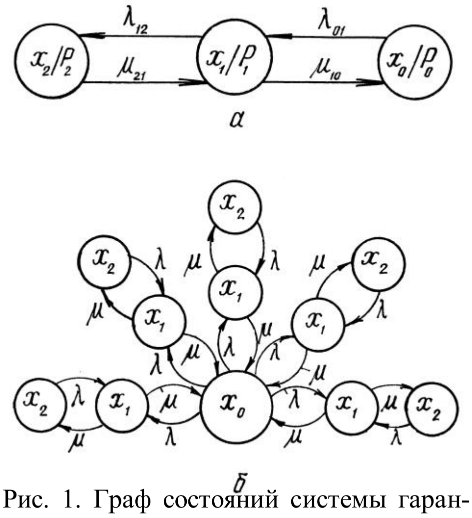

Рис. 1. Граф состояний системы гарантийного одновременного обслуживания ЛМЗ передвижными средствами (с вероятностью перехода системы справа налево): *а* – при одном заказчике; *б* – при множестве заказчиков; x_0 – нерабочее состояние; x_1 – транспортное; x_2 – рабочее

Первый вариант предусматривает выполнение объема технических воздействий и всех транспортных перемещений в течение не более одних суток. Этот вариант имеет подварианты по числу ремонтных рабочих на ПМ; в частности, при непрерывной работе в течение более двух смен в группу включается дополнительный слесарь-водитель.

Второй вариант предусматривает вахтовую работу ПМ (рис. 2), когда в течение нескольких дней последовательно обслуживается так называемый куст ЛЗП одного или нескольких предприятий, территориально близких друг к другу.

Согласно графу, представленному на рис. 1, *а*, после перехода из транспортного состояния в рабочее, ПМ снова возвращается в нерабочее.

Вероятность (P_i) того, что время (T_2) технического обслуживания лесозаготовительных машин i-го ЛЗП меньше или равно запланированному времени работы ПМ ($T_{см}$ = 8, 16, 24 ч), имеет вид $P_i = P(T_2 \le T_{см})$.

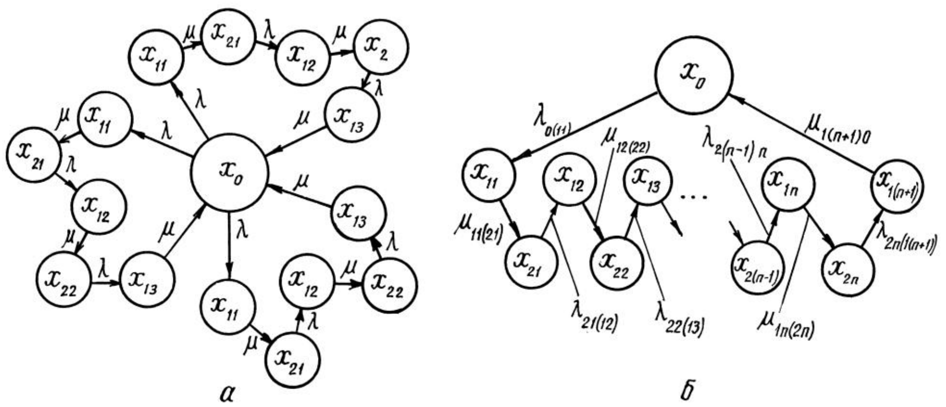

Рис. 2. Граф состояний системы гарантийного последовательного обслуживания потребителей ЛЗМ, территориально распределенных по районам с вероятностью перехода системы справа налево: *а* – обслуживания нескольких районов; *б* – одного района

Вероятность того, что после каждого перехода из рабочего состояния в транспортное ПМ возвращается в рабочее для выполнения следующей заявки, пока, согласно графу на рис. 2, *б*, ПМ не использует свой вахтовый временный ресурс, равна:

$$P_i = 1 - P_i\left[\sum_{i=1}^{n} T_2 > T_{\text{см}}\right]. \qquad (1)$$

Функционирование каждой ПМ можно моделировать по следующим вероятностным состояниям: x_0 – нерабочее (пункт дислокации); x_{11}, x_{12}, x_{13}, $x_{1(n-1)}$, x_{1n}, $x_{1(n+1)}$ – транспортное (перемещение к ЛЗП под номерами 1, 2, 3, n–1, n, n+1 (в парк; к месту дислокации); x_{21}, x_{22}, x_{23}, $x_{2(n-1)}$, x_{2n} – рабочее на ЛЗП под номерами 1, 2, 3, n–1, n.

Принимаем, что число обращений (заявок) на технические воздействия подчиняется пуассоновскому закону распределения и для варианта состояний системы, изображенных графом на рис. 2, *а*, составим систему алгебраических уравнений, из которой определим вероятность нахождения ПМ в каждом из приведенных выше состояний.

Итак, согласно мнемоническому правилу «Что втекает, то и вытекает» [1] и графу на рис. 2, *б* с вероятностью перехода справа налево имеем

$$\begin{aligned}
&- P_0\lambda_{0(11)} + P_{1(n+1)}\,\mu_{1(n+1)0} = 0;\\
&- P_{11}\mu_{11(21)} + P_0\lambda_{0(11)} = 0;\\
&- P_{21}\lambda_{21(12)} + P_{11}\mu_{11(21)} = 0;\\
&- P_{22}\lambda_{22(13)} + P_{12}\mu_{12(22)} = 0;\\
&- P_{13}\mu_{13(23)} + P_{22}\lambda_{22(13)} = 0; \qquad (2)\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&- P_{1\,n}\mu_{1n(2n)} + P_{2(n-1)}\lambda_{2(n-1)n} = 0;\\
&- P_{2\,n}\lambda_{2n[1(n+1)]} + P_{1n}\mu_{1n(2n)} = 0;\\
&- P_{1(n+1)}\mu_{1(n+1)0} + P_{2n}\lambda_{2n[1(n+1)]} = 0,
\end{aligned}$$

где P_i – вероятность нахождения ПМ в одном конкретном (i = 1, 2, 3, …, n) из возможных состояний;

λ_{ij}, μ_{ij} – интенсивность соответственно входа и выхода системы (ПМ) из состояния i в состояние j.

Из уравнения (2) определяем вероятность нахождения ПМ в каждом из возможных событий:

$$P_{11} = P_{21}\,\lambda_{21(12)}/\mu_{11(21)};\; P_{12} = P_{21}\,\lambda_{21(12)}/\mu_{12(22)};\; P_0 = P_{21}\,\lambda_{21(12)}/\lambda_{0(11)};$$
$$P_{22} = P_{21}\,\lambda_{21(12)}/\lambda_{22(13)};\; \ldots;\; P_{2n} = P_{21}\,\lambda_{21(12)}/\lambda_{2n\,[1(n+1)]};\; P_{1(n+1)} = P_{21}\,\lambda_{21(12)}/\mu_{1(n+1)}.$$

Учитывая, что сумма вероятностей всех состояний равна единице [1], т. е. $\sum_{i=1}^{n} P_i = 1$, можно записать выражение вероятности рабочего состояния на первом ЛЗП в следующем виде:

$$P_{21} = 1 - (P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{22} + P_{13} + \ldots + P_{2n} + P_{1(n+1)}) =$$
$$= \left[1 + \lambda_{21(12)}\left(\frac{1}{\lambda_{0(11)} + \mu_{11(21)} + \mu_{12(22)} + \lambda_{22(13)} + \mu_{13(23)} + \lambda_{2n[1(n+1)]} + \mu_{1(n+1)0}}\right)\right]^{-1}. \quad (3)$$

Принимая дорожные условия между ЛЗП идентичными и транспортную скорость (V) ПМ постоянной, определяем время ($t_{д}$) нахождения ПМ в движении. Суммарное время нахождения ПМ в пути $\left(\sum_{i=1}^{n+1} t_{дi}\right)$ равно:

$$\left(\sum_{i=1}^{n+1} t_{дi}\right) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} L_i}{V}, \quad (4)$$

где L_i – расстояние между ЛЗП и местонахождением (местом дислокации) парка ПМ;

n – число ЛЗП;

n + 1 – число транспортных состояний с учетом возвращения ПМ к месту дислокации.

Суммарное время работы $\left(\sum_{i=1}^{i} t_{р}\right)$ ПМ (в течение смены, суток, периода вахты) равно:

$$\sum_{i=1}^{n} t_{рi} = t_{тв}\left(\sum_{j=1}^{m} TB_1 + \sum_{j=1}^{m} TB_2 + \ldots + m\sum_{j=1} TB_{jn}\right) = t_{тв}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} TB_{ji}, \quad (5)$$

где $t_{рi}$ – время технических воздействий на i-м ЛЗП;

$t_{тв}$ – нормативное время выполнения j-го вида технических воздействий (TB_j), как обратная величина часовой производительности ПМ;

m – число видов технических воздействий.

Время ($T_г$) нахождения ПМ в пункте дислокации равно:

$$T_г = kT_{см} + \left(\sum_{i=1}^{n+1} t_{дi} + \sum_{i=1}^{n+1} t_{рi} \right), \qquad (6)$$

где $T_{см}$ – продолжительность работы ПМ в течение смены (суток, вахты);

k – доля суммарного времени работы (технических воздействий) и времени в движении (в переездах) от рабочего времени смены (суток, вахты). Она определяется по выражению

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} t_{дi} + \sum_{i=1}^{n} t_{рi}}{T_{см}} \qquad (7)$$

с последующим округлением до ближайшего большего целого числа.

Величина k определяет форму организации работы ПМ, которая может иметь два варианта:

а) ежедневно после завершения рабочего времени ПМ возвращается в парк или пункт дислокации;

б) ПМ возвращается в пункт дислокации только после выполнения необходимого объема работ.

С учетом выражений (4)–(6) по формуле (3) можно определить вероятность (P_{21}) нахождения ПМ в работе на первом ЛЗП:

$$P_{21} = \left[1 + \frac{1}{\sum_{j=1}^{m} TB_{ji}} \left[\sum_{i=1}^{n+1} \frac{L_i}{V} + \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} TB_{ji}}{П} + \frac{1}{kT_{см} - \left(\sum_{i=1}^{n+1} t_{дi} + \sum_{i=1}^{n} t_{рi} \right)} \right] \right]^{-1}, \qquad (8)$$

где $П$ – средняя производительность ПМ, ТВ/ч.

Вероятность нахождения ПМ в пути (при переездах), с учетом все тех же формул,

$$P_д = P_{21} \frac{\sum_{i=1}^{n+1} L_i}{t_{тв} \sum_{j=1}^{m} TB_{ji} V_{ср}}. \qquad (9)$$

Вероятность нахождения ПМ в пункте дислокации с учетом (9)

$$P_d = \frac{P_{21}}{\sum_{j=1}^{m} TB_{ji} kT_{см} - \left(\sum_{i=1}^{n+1} t_{дi} + \sum_{i=1}^{n} t_{рi} \right)}. \qquad (10)$$

Рассмотрим пример моделирования технического обслуживания лесозаготовительных машин, производимого мастерской типа ЛВ-8Б, трех ЛЗП, для которых в данный момент требуется следующий объем технических воздействий: на первом – одно ТО-3 (14 ч), на втором – два (28 ч), на третьем – два (28 ч).

Лесозаготовительные пункты расположены на расстоянии соответственно 40 и 50 км, расстояние от пункта дислокации до первого ЛЗП составляет 25 км, до последнего 35 км. Продолжительность ежедневной работы (смены) ЛВ-8Б равна 16 ч, скорость передвижения – 50 км/ч. ПМ ЛВ-8Б работает в течение 5 дн., исключая ежедневное возвращение в пункт дислокации (вахтовый метод).

По формулам (4)–(6) находим общую продолжительность передвижений ПМ ($\sum\limits_{i=1}^{n+1}\frac{L_i}{V}$), выполнения технических воздействий ($\Sigma t_{\text{р}i}$) и время нахождения в пункте дислокации ($T_{\text{г}}$):

$$\sum_{i=1}^{n+1}\frac{L_i}{V}=\frac{25}{50}+\frac{40}{50}+\frac{50}{50}+\frac{35}{50}=3\text{ ч};$$

$$\sum t_{\text{р}i}=t_{\text{тв}}\sum\sum TB_{ji}=1(14+28+28)=70\text{ ч};$$

$$T_{\text{г}}=kT_{\text{см}}-\left(\sum_{i=1}^{n+1}t_{\text{д}i}+\sum_{i=1}^{n}t_{\text{р}i}\right)=5\cdot 16-73=7\text{ ч}.$$

Вероятности нахождения ПМ в возможных состояниях определяются согласно выражениям (3), (8)–(10):

$$\lambda_0(1)=\frac{7}{80}=0{,}088;\ \mu_{11}(1)=\frac{0{,}5}{80}=0{,}006;\ \lambda_{21}(2)=0{,}175;\ \mu_{12}(2)=0{,}01;\ \lambda_{22}(3)=0{,}35;$$
$$\mu_{13}(3)=0{,}008;\ \lambda_{2n}(n+1)=0{,}35;\ \mu_1(n+1)=0{,}009.$$

Вероятность нахождения ПМ в рабочем состоянии на первом ЛЗП

$$P_{21}=\left[1+\frac{1}{14}\left(3+\frac{70}{1}+\frac{1}{\left(\frac{73}{16}\approx 5\right)\cdot 16-73}\right)\right]^{-1}=0{,}163;$$

на других ЛЗП

$$P_{22}=0{,}163\left(\frac{1}{14}/\frac{1}{28}\right)=0{,}326;\ P_{23}=0{,}326.$$

Суммарная вероятность нахождения ПМ в рабочем состоянии $\sum\limits_{i=1}^{n}P_{2i}=0{,}815$.

P_{11} = 0,061(0,0714/2,00) = 0,0022; P_{12} = 0,061(0,0714/1,25) = 0,0035;
P_{13} = 0,061(0,0714/1) = 0,0043; $P_{1(n+1)}$ = 0,061(0,0714/1,4286) = 0,0030.

Суммарная вероятность нахождения ПМ в движении (транспортном состоянии) $\sum_{i=1}^{n+1} P_{1i} = 0{,}013$. Суммарная вероятность нахождения ПМ в рабочем, транспортном состоянии, а также в пункте дислокации равна:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{2i} + \sum_{i=1}^{n+1} P_{1i} + P_d = 0{,}950.$$

Коэффициент использования машин ПМ ($K_м$):

$$K_м = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{2i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{2i} + \sum_{i=1}^{n+1} P_{1i} + P_d} = 0{,}86.$$

Подбирая маршруты, соответствующие заявкам на выполнение технических воздействий, можно добиться увеличения коэффициента использования, величина которого может быть близка к единице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Питухин А.В., Шиловский В.Н., Серебрянский Н.И.* Применение вероятностно-статистических методов для решения задач по надежности и ремонту машины и оборудования: Учеб. пособие. – Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1999. – 148 с.

Петрозаводский государственный
университет

Поступила 04.05.2000 г.

V.N. Shilovsky

Mathematical Model of Logging Machines Maintenance by Mobile Units

The mathematical model is provided for the efficiency estimate of logging machines maintenance by mobile shops.