

УДК 629.331

О. А. Шаламова, Е. В. Самойлова, Е. О. Юркова, Г. Г. Ядрошникова

Способы повышения эффективности эксплуатации транспортно-технологических комплексов с использованием имитационного моделирования

Одним из путей повышения эффективности транспортных и технологических машин является определение резервов производительного времени техники, в частности, путем использования имитационного моделирования технической эксплуатации. Проблема построения имитационной модели требует решения задачи идентификации. Понятие идентификации охватывает круг вопросов, связанных с определением значений данных, параметров и переменных модели, необходимых для полного ее описания по результатам обследования объекта. То есть задача идентификации состоит в отыскании таких параметров модели, которые бы уменьшили (насколько возможно) величину несоответствия между показателями модели и реального объекта. Эта задача в данной статье решается в процессе создания модели по результатам сравнения накопленных экспериментальных данных и реальных показателей системы технического обслуживания.

Экспертный анализ результатов моделирования может проводиться как с целью совершенствования имитационной модели, так и с целью выбора и сравнения сценариев моделирования. Интерпретация заключается в практическом использовании результатов моделирования в виде управленческих решений по эксплуатации или рекомендаций по совершенствованию конструктивных особенностей транспортных и технологических машин.

В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования изменения технического состояния транспортных и технологических машин с целью повышения эффективности их эксплуатации на основе имитационного моделирования. При этом рассматривались различные состояния техники, в том числе внезапные отказы, требующие ремонта в стационарных условиях. Взамен вышедшей из строя машины может быть введена резервная, но это условие в процессе моделирования было исключено.

Эксплуатация транспортных и технологических машин может сопровождаться внезапными отказами и достаточно частыми заменами узлов и деталей. В том случае, когда машина работает исправно, она будет приносить предприятию прибыль. В случае же отказа вместо прибыли имеют место затраты на ремонт техники в стационарных условиях. Использование имитационного моделирования позволит найти наиболее рациональные пути повышения эффективности эксплуатации транспортных и технологических машин с достоверной оценкой соответствия модели реальным процессам.

Ключевые слова: эксплуатация машин, техническое состояние, имитационное моделирование, отказ, переход состояний, затраты.

Используемые в настоящее время разнообразные информационно-аналитические методы управления сложными системами (техническими, технологическими, производственно-экономическими) позволяют специалистам принимать наиболее рациональные и экономически выгодные управленческие решения. Управление системой эксплуатации транспортно-технологических комплексов (ТТК), рассматриваемой как совокупность сложных технологических и организационных процессов, осуществляемых в пространстве и во времени, также зачастую базируется на методах, дающих возможность рассмотрения этих процессов в рамках математических и имитационных моделей [1, 2].

Известно, что в течение определенного временного горизонта ТТК, в зависимости от технического состояния, могут переходить из одного состояния в другое, третье и т. д. При

этом тот или иной ТТК в определенном состоянии может выполнять какую-либо деятельность или в отношении его осуществляются какие-либо воздействия (может находиться на объектах работ, быть в процессе выполнения плановых технических воздействий, в состоянии внезапного отказа и т. д.). Однако целевым состоянием ТТК является нахождение в производственной эксплуатации [3–5]. В связи с этим цель данной работы – поиск резервов сокращения числа переходов состояний и времени простоя техники в период между двумя целевыми состояниями [6].

Фактическое техническое состояние машин определяется комплексом технологических, конструктивных, организационных факторов, имеющих вероятностный характер и значительно затрудняющих планирование выполнения технических воздействий по поддержанию работоспособности техники. Время

нахождения ТТК в состояниях, отличных от целевого, включая техническое обслуживание (ТО), плановые или внеплановые ремонты (Р), перебазировку техники к объектам работ и другое, в конечном итоге сокращает производительность машин и приводит к дополнительным издержкам предприятия [7–9].

В данной статье рассматривается возможность сокращения числа переходов состояний и времени нахождения ТТК в состояниях ТО и Р для повышения эффективности их эксплуатации на основе моделирования процессов технического обслуживания машин при различных стратегиях поддержания работоспособности техники.

Под стратегией понимается комплекс целей и задач по достижению наилучших результатов в области технической эксплуатации ТТК. В мировой практике технической эксплуатации различают, главным образом, следующие стратегии [9, 10]:

- стратегия, при которой ремонтные воздействия осуществляются по потребности и направлены на устранение последствий внезапных отказов, т. е. аварийно-восстановительная;
- стратегия, в соответствии с которой выполнение ремонтно-обслуживающих работ осуществляется со строго установленной периодичностью наработки техники, т. е. планово-предупредительная (ППР);
- стратегия, предусматривающая выполнение ремонтно-обслуживающих воздействий по фактическому техническому состоянию машин в целом и их основных узлов и агрегатов, устанавливаемому на основе технического диагностирования.

Известно, что имитационное моделирование, как процесс структурирования подбора алгоритмов и параметров системы ТО и Р, требует большого количества наблюдений, так называемых реализаций. Такие реализации позволяют наблюдать переход транспортной машины, например автомобиля, из одного состояния (когда он исправен и работает на линии) в другое (когда во время эксплуатации возникла неисправность и потребность в ремонте). Для практического исследования в данном случае необходимо большое количество наблюдений по видам, времени отказов техники и затратам на их устранение. На предприятиях, имеющих парки

транспортных машин, в настоящее время такой учет ведется в обязательном порядке, что позволяет получить достаточный объем статистических данных.

По данным такой статистики в работе были выполнены исследования по двум стратегиям:

- 1) стратегии по фактическому техническому состоянию с предупредительными техническими воздействиями по недопущению возможных отказов (состояние *O*);
- 2) аварийно-восстановительной стратегии, согласно которой автомобиль находится на линии до возможного перехода в состояние отказа в результате появления и развития каких-либо неисправностей.

В соответствии со стратегией 1 автомобиль некоторое время был исправен (состояние *I*), затем появляется некая неисправность, из-за которой он переходит в другое состояние (состояние *H*). В этом случае отказа фактически пока еще нет, но руководство предприятия с целью предупреждения отказа на линии принимает решение отозвать автомобиль с линии для устранения неисправностей. Поскольку речь идет о повышении эффективности эксплуатации техники, в том числе экономической эффективности, возникает вопрос, правильным ли будет решение, принятое руководством о возврате автомобиля с линии?

Стохастический характер случайных процессов при изменении технического состояния машин обуславливает некоторое расхождение между результатами, полученными на основе имитационного моделирования, и данными реальной системы, т. е. результаты моделирования будут отличаться от реальных, принятых к рассмотрению. В связи с этим для подтверждения достоверности полученных результатов необходима оценка степени их точности, т. е. оценка степени точности соответствия полученных результатов какому-то истинному значению.

Точность получаемых в ходе имитационного моделирования результатов можно оценивать рядом показателей, в том числе числом испытаний (количеством реализаций) *N* и степенью расхождения полученных результатов и реальных статистических данных в одинако-

вых производственных условиях. Например, какой-либо параметр X , имеющий вероятностный характер, по результатам имитационного моделирования может принимать случайные значения $x_1, x_2, \dots, x_n$. Тогда для дальнейших расчетов принимается значение этого параметра, равное x_{cp} . Однако ввиду вероятностного характера параметра x_{cp} следует помнить, что он будет отличаться от истинного значения параметра X , при этом достоверность полученных результатов может быть подтверждена в том случае, если разница между истинным значением параметра X и параметром x_{cp} будет меньше некоторой предельно допустимой для данного параметра величины ε :

$$|X - x_{cp}| < \varepsilon. \quad (1)$$

Степень достоверности оценки x_{cp} характеризуется величиной α – доверительной вероятностью того, что неравенство (1) выполняется. Тогда

$$p(|\alpha - x_{cp}| < \varepsilon) = \alpha, \quad (2)$$

где α – уровень значимости, доверительная вероятность, при этом $(1 - \alpha)$ – достоверность.

Выражение (2) берется за основу при определении точности результатов статистических испытаний, т. е. результатов численных экспериментов имитационного моделирования, положенных в основу принятия того или иного управленческого решения о дальнейшей эксплуатации техники или о ее выводе в состояние ТО или Р.

Изложенные выше положения в данной работе можно иллюстрировать следующим примером. Предположим, что $p_{II} = 0,2$ – вероятность перехода автомобиля из состояния II в состояние H в течение дня; $p_O = 0,1$ – вероятность перехода автомобиля из состояния H в состояние O в течение дня.

Требование к точности модели: если точность полученных оценок будет в пределах 10 %, то нельзя утверждать, что одна из стратегий предпочтительнее, поэтому разница между ними должна быть больше 10 %.

Для вычисления точности ε оценки x_{cp} при заданном значении достоверности α можно использовать выражение [8]

$$\varepsilon = t_\alpha \sqrt{p(1-p)/N}, \quad (3)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента, зависящий от α (принято $t_\alpha = 2,5$); p – вероятность наступления

некоторого случайного события, например H ; N – количество реализаций моделирования.

Поскольку вероятность p заранее неизвестна, на практике можно предварительно принять $N_0 = 50 \dots 100$ реализаций, по результатам которых определяется величина p по формуле [6, 8]

$$p = m / N, \quad (4)$$

где m – число определяемых параметров, например, вероятность наступления какого-либо события (перехода состояния техники).

Количество реализаций N для оценки вероятности наступления некоторого события, означающего переход из одного состояния в другое, например из II в H , для рассматриваемых условий было принято в данном примере согласно статистическим данным ПАТП А (выборка реализаций за октябрь 2016 г. для стратегий 1 и 2).

Результаты расчетов по стратегиям 1 и 2 приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Стратегия 1: по данным ПАТП для этой стратегии за смену доход составляет 5 600 р., затраты на ремонт – 7 600 р., при этом за данный период не наблюдалось ни одного перехода из состояния H . То есть в соответствии со стратегией 1 принято решение снять автомобиль с линии для устранения появившейся неисправности.

Результаты расчетов по стратегии 1 свидетельствуют о том, что средний доход C_1 составляет 3 620 р./см. при запланированном доходе 5 600 р./см. Возникает вопрос, правильно ли было принято решение руководством о возврате автомобиля с линии? А что было бы, если бы он и дальше работал и приносил прибыль?

Стратегия 2 – аварийно-восстановительная. Теоретически отказ и неисправность могут произойти со сколько угодно малой периодичностью, тогда автомобиль будет работать на линии до тех пор, пока не возникнет отказ и не потребуются его устранение (ремонт).

На основе экспертной оценки инженерной группы ПАТП во главе с главным механиком данного предприятия и по результатам анализа работы автомобиля был сделан вывод о том, что за принятый период времени была допущена ситуация невозврата автомобиля на базу при переходе из исправного состояния в состояние появления неисправности (табл. 2).

Таблица 1

Моделирование по стратегии 1

Номер реализации	Дата	Состояние (из И в Н)	Доход C_i	Среднее	Точность оценки ε
1	01.10.2016	И	5 600	5 600	0,000
2	02.10.2016	И	5 600	5 600	0,000
3	03.10.2016	И	5 600	5 600	0,000
4	04.10.2016	И	5 600	5 600	0,000
5	05.10.2016	Н	-7 600	2 960	0,471
6	06.10.2016	И	5 600	3 400	-0,149
7	07.10.2016	И	5 600	3 714	-0,092
8	08.10.2016	И	5 600	3 950	-0,063
9	09.10.2016	И	5 600	4 133	-0,046
...	...	...	...	...	...
19	19.10.2016	И	5 600	4 280	-0,035
20	20.10.2016	И	5 600	4 400	-0,028
21	21.10.2016	И	5 600	4 500	-0,023
22	22.10.2016	И	5 600	4 585	-0,019
23	23.10.2016	И	5 600	4 657	-0,016
24	24.10.2016	И	5 600	4 720	-0,013
25	25.10.2016	Н	-7 600	3 950	0,163
26	26.10.2016	И	5 600	4 047	-0,025
27	27.10.2016	Н	-7 600	3 400	0,160
28	28.10.2016	И	5 600	3 516	-0,034
29	29.10.2016	И	5 600	3 620	-0,030
30	30.10.2016	Н	-7 600	3 086	0,148

Таблица 2

Моделирование по стратегии 2

Номер реализации	Дата	Состояние (из И в Н)	Состояние (из Н в О)	Доход C_i	Среднее	Точность оценки ε
1	01.10.2016	И	И	5 600	5 600	0,000
2	02.10.2016	И	И	5 600	5 600	0,000
3	03.10.2016	И	И	5 600	5 600	0,000
4	04.10.2016	И	И	5 600	5 600	0,000
5	05.10.2016	Н	Н	-2 000	4 080	0,271
6	06.10.2016	Н	О	-15 200	867	0,788
7	07.10.2016	И	И	5 600	1 543	-0,780
8	08.10.2016	И	И	5 600	2 050	-0,329
9	09.10.2016	И	И	5 600	2 444	-0,192
...	...	...	...	...	...	...
19	19.10.2016	И	И	5 600	2 760	-0,129
20	20.10.2016	И	И	5 600	3 018	-0,094
21	21.10.2016	И	И	5 600	3 233	-0,071
22	22.10.2016	И	И	5 600	3 415	-0,056
23	23.10.2016	И	И	5 600	3 571	-0,046
24	24.10.2016	И	И	5 600	3 707	-0,038
25	25.10.2016	Н	Н	-2 000	3 350	0,096
26	26.10.2016	И	И	5 600	3 482	-0,040
27	27.10.2016	Н	Н	-2 000	3 178	0,087
28	28.10.2016	И	И	5 600	3 305	-0,040
29	29.10.2016	И	И	5 600	3 420	-0,035
30	30.10.2016	Н	О	-15 200	2 533	0,259

Автомобиль доработал смену, однако в конце смены произошел отказ, потребовавший выполнения ремонта, при этом затраты на устранение отказа C_2 составили 15 200 р.

Моделирование по стратегии 2 показывает, что средний доход за смену C_2 составляет 3 420 р.

Выбор наиболее оптимальной стратегии в данном случае осуществляется путем сравнения полученных средних значений дохода в каждом варианте, т. е. оптимальность стратегии будет определяться максимальным значением среднего дохода, но при условии, что разница между значениями дохода будет больше 10 % в соответствии с требованием к точности модели. В рассматриваемом случае – 5,6 %. Это значит, что нельзя утверждать, что первая стратегия лучше второй.

Точность оценки применяемой стратегии, полученной имитационным моделированием, можно определить, если на каждой i -й реализации вычисляется возможный результат самого неблагоприятного исхода в $(i + 1)$ -й реализации. Неблагоприятным является тот исход, который максимально изменяет получаемую оценку параметра, т. е. переход осуществляется в самое неблагоприятное техническое состояние машины. Если разница между этими оценками укладывается в заданную точность моделирования, то процесс моделирования можно остановить, а оценку параметра, полученную в i -й реализации, принять за значение этого параметра.

Этот способ определения точности оценки требует выполнения дополнительных вычислений оценок в $(i + 1)$ -й реализации, т. е. нужно найти точность определения дохода C в 29-й реализации.

При моделировании по стратегии 1 получим

$$\varepsilon = \frac{|\bar{C}_i - \bar{C}_{i+1}|}{\bar{C}_i} = \frac{|\bar{C}_{29} - \bar{C}_{30}|}{\bar{C}_{29}} = \frac{|3\,620 - 3\,086|}{3\,620} = 0,148,$$

где C_{29} и C_{30} – средние значения дохода, полученные в 29-й и 30-й реализациях соответственно, р./см.

В 30-й реализации полученный доход C мог быть либо 5 600 р., либо –7 600 р. Очевидно, что самый неблагоприятный исход, максимально изменяющий значение C , будет в том случае, если в 30-й реализации произойдет событие H и значение затрат будет равно –7 600 р. В этом случае $C_{30} = 3\,086$ р.

Теперь рассмотрим тот же случай для стратегии 2. Точность определения C в 29-й реализации составит

$$\varepsilon = \frac{|3\,420 - 2\,533|}{3\,420} = 0,259.$$

Значение C_{30} определяется так же, как и для стратегии 1, только самый неблагоприятный исход будет в случае, если в 30-й реализации произойдет событие O ($C = -15\,200$ р., $C_{30} = 2\,533$ р.).

Определим точность результатов имитационного моделирования для заданных реализаций ($N = 29$).

Для стратегии 1: число наступления неисправностей $m = 4$. Тогда

$$p_1 = 4 / 29 = 0,137;$$

$$\varepsilon_1 = 2,5\sqrt{0,137(1 - 0,137) / 29} = 0,159.$$

Для стратегии 2: число наступления неисправностей и отказов $m = 5$. Тогда

$$p_2 = 5 / 29 = 0,172;$$

$$\varepsilon_2 = 2,5\sqrt{0,172(1 - 0,172) / 29} = 0,175.$$

Отсюда следует, что точность определения значений C для обеих стратегий все же недостаточна, чтобы однозначно сделать вывод об оптимальности одной из стратегий, поэтому необходимо продолжать моделирование.

Значения C для обеих стратегий могут быть также получены аналитически.

Для стратегии 1 при переходе от $И$ в $Н$ вероятность $p_{ИН} = 0,2$, следовательно, в 80 % реализаций $C_{И-И} = 5\,600$ р., в оставшихся 20 % $C_{И-Н} = -7\,600$ р., т. е.

$$C_1 = 0,8C_{И-И} + 0,2C_{И-Н},$$

$$C_1 = 0,8 \cdot 5\,600 - 0,2 \cdot 7\,600 = 2\,960 \text{ р.}$$

Для стратегии 2 в 80 % реализаций значение $C_{И-И} = 5\,600$ р. В числе оставшихся 20 % реализаций возможно два исхода: переход из состояния $Н$ в состояние O с вероятностью $p_{ОН} = 0,1$; следовательно, в 10 % реализаций затраты $C_{Н-О} = -15\,200$ р., а в 90 % при вероятности перехода из состояния $И$ в состояние $Н$ затраты $C_{И-Н} = (5\,600 - 7\,600) = -2\,000$ р., тогда средний доход определится по формуле

$$C_2 = 0,8C_{И-И} + 0,2(0,9C_{И-Н} + 0,1C_{Н-О}), \quad (5)$$

$$C_2 = 0,8 \cdot 5\,600 - 0,2(0,9 \cdot 2\,000 + 0,1 \cdot 15\,200) = 3\,816 \text{ р.}$$

Отсюда можно сделать вывод, что стратегия 2 наиболее приемлема, так как точность

полученных оценок составляет 22,4 % (более 10 %).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что использование имитационного моделирования в целях повышения эффективности эксплуатации транспортных и технологических машин при большом количестве реализаций позволяет получать искомые результаты, близкие к значениям, получен-

ным аналитически. Следовательно, такие результаты с большой достоверностью могут быть использованы при принятии наиболее экономически выгодных управленческих решений по осуществлению технической эксплуатации транспортных и технологических машин с учетом возможных переходов состояний техники, особенно для техники с небольшим ресурсом до капитального ремонта.

Библиографический список

1. Хабибулин Р. Г., Макарова И. В. Использование имитационного моделирования для решения задачи о размещении автосервисных предприятий // Вестник Ижевского государственного технического университета. Ижевск: Изд-во ИГТУ, 2006. № 2. С. 81–84.
2. Манаков Л. Ф., Моисеенко В. В., Чернов В. Д. Исследование процессов функционирования машинных парков строительных организаций на основе имитационного моделирования. Новосибирск: Сибирское РО РААСН, 1997. 80 с.
3. К вопросу повышения эффективности эксплуатации транспортно-технологических машин // Е. О. Юркова, Е. В. Самойлова, О. А. Шаламова, Г. Г. Ядрошникова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2. С. 12–16.
4. Управление эффективностью эксплуатации транспортно-технологических комплексов // Р. Р. Кабиров, Е. В. Самойлова, О. А. Шаламова, Е. О. Юркова, Г. Г. Ядрошникова // Политранспортные системы: Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Новосибирск, 2015. С. 595–598.
5. Полетаев В. П., Богданов Д. А. Применение автоматизированного комплекса для оценки состояния технических систем со скрытыми отказами // Надежность и качество сложных систем. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. № 3 (15). С. 80–84.
6. Повышение эффективности эксплуатации транспортно-технологических комплексов / О. А. Шаламова, Е. В. Самойлова, Е. А. Юркова, Г. Г. Ядрошникова // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Тюмень: ТИУ, 2017. С. 466–470.
7. Гриб В. В., Петрова И. М., Романов А. Н. Оценка вероятности отказа механических систем моделирования технического состояния // Проблемы машиностроения и надежности машин. М.: Наука, 2016. № 5. С. 55–60.
8. Бабина О. И., Мошкович Л. И. Имитационное моделирование процессов планирования на промышленном предприятии. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. 152 с.
9. Кузнецов С. М. Теория и практика формирования комплектов и систем машин в строительстве: Дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 2015. 256 с.
10. Давыдова А. А., Бабенко А. В., Курзаева Л. В. Разработка имитационной модели транспортного обслуживания строительства с использованием имитационного моделирования // Современная техника и технологии. Магнитогорск: Изд-во МГТУ. 2016. № 11 (63). С. 64–71.

O. A. Shalamova, E. V. Samoylova, E. O. Yurkova, G. G. Yadroshnikova

Ways to Improve the Efficiency of Transport-technological Complexes Operation Using Simulation Modeling

Abstract. One of the ways to improve the efficiency of transport and technological machines is to determine the productive time technology reserves, in particular, by using technical operation simulation. The problem of constructing a simulation model requires solving the identification problem. The concept of identification covers a range of issues related to the definition of data values, parameters and model variables necessary for its complete description based on the survey of the object. That is, the task of identification consists in finding such model parameters that would reduce (as far as possible) the magnitude of the discrepancy between the parameters of the model and the real object. This task is solved in this article in the process of creating the model based on the comparison of the accumulated experimental data results and real indicators of the maintenance system.

Expert analysis of modeling results can be carried out both to improve the simulation model and to select and compare modeling scenarios. The interpretation consists in the practical use of simulation results in the form of management decisions on the operation or recommendations for improving the design features of transport and technological machines.

The paper presents the results of the theoretical and experimental study of the changes in the technical condition of transport and technological machines in order to increase the efficiency of their operation on the basis of simulation modeling. At the same time, various states of technology were considered, including sudden failures requiring repair under stationary conditions. Instead of the failed machine, a backup can be introduced, but this condition was excluded during the modeling process.

The operation of transport and technological machines can be accompanied by sudden failures and frequent replacement of units and parts. In the case when the machine is working properly, it will bring profit to the enterprise. In the case of failure, instead of profit, there are costs for repairing equipment in stationary conditions. Taking these states into account using simulation allows us to find the most rational ways to increase the efficiency of transport and technological machines operation with a reliable assessment of the model's correspondence to real processes.

Key words: *machine operation; technical condition; simulation modeling; failure; state transition; costs.*

Шаламова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: oksana.sh73@mail.ru

Самойлова Елена Владимировна – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: sev@stu.ru

Юркова Елена Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: urk@stu.ru

Ядрошникова Галина Григорьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: ter@stu.ru