

УДК 622-027.31; 622:658.512

**МОДЕЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ПРИМЕРЕ УГОЛЬНОГО КАРЬЕРА В СЕРБИИ**

**Д. Я. Крунич¹, С. Вуйич², М. Танасиевич³,
Б. Димитриевич³, Т. Шубаранович³, С. Илич³, С. Максимович²**

¹Министерство горного дела и энергетики Сербии

E-mail: dragica.jagodickrunic@mre.gov.rs, Неманьина, 22-26, г. Белград, Сербия

²Институт горного дела, Батайнички пут, 2, г. Белград, Сербия

³Белградский университет, факультет горного дела и геологии, Бушина, 7, г. Белград, Сербия

Представлены два модельных подхода к оценке жизненного цикла вспомогательных горных машин, один из которых основывается на теории надежности, а другой — на принципе затратного подхода. В ходе эксплуатации машин уровень их надежности снижается, в то время как эксплуатационные расходы растут. Данные показатели противоположных тенденций определяют работоспособность машин и обеспечивают основу для принятия решения о целесообразности дальнейшей эксплуатации, обслуживания или замены машин. На примере бульдозера, как наиболее часто используемой машины для выполнения вспомогательных работ на угольных карьерах “Электрохозяйства Сербии”, проведен сравнительный анализ применения обоих модельных подходов с оценкой и выводом.

Жизненный цикл машины, надежность, расходы, принятие решений, бульдозер, угольный бассейн “Колубара”

DOI: 10.15372/FTPRPI20180306

Исследования в области теории надежности технических систем проводятся по нескольким направлениям, занимающимся отношением надежности и стратегии обслуживания, надежности и жизненного цикла машин, снижения расходов и повышения эффективности обслуживания, а также отношением надежности и усталости материалов, надежности и конструкции машины и т. д. [1–6]. Надежность функционирования технических систем концептуально закреплена ISO-IEC стандартами [7] в целях определения их готовности как меры качества обслуживания. От показателей надежности функционирования технических систем — безотказности, ремонтпригодности и обеспечения материалами технического обслуживания и технического ремонта — зависят качество обслуживания и стоимость жизненного цикла систем. Таким образом, современные методы оценки жизненного цикла технических систем основываются на критериях эконометрического и эксплуатационного потенциала.

В классе эконометрических методов используются модели динамического программирования [8–10], модель оценки стоимости жизненного цикла технических систем в соответствии со стандартом IEC 300-3-3 [11] и Caterpillar модель оценки издержек владения и операционных расходов оборудования и машин [12].

Надежность и соответствующее количество исходных данных являются предпосылкой успешного применения любой модели. Конечный результат также зависит от выбора модели и критического отношения к результатам обработки. С учетом того что не существует общепринятой согласованной инструкции по выбору методологии оценки жизненного цикла технических систем для данных условий, считаем, что в процессе подобных анализов следует параллельно применять как минимум две модели. В настоящей работе представлены результаты исследований, реализованных на открытых карьерах горнодобывающего бассейна “Колубара”. Бассейн “Колубара” с годовой добычей угля 35 млн т — основа производства теплоэлектроэнергии “Электрохозяйства Сербии”. Представленный анализ основан на данных, собранных в результате мониторинга работы бульдозеров трех известных производителей горного оборудования и машин, а в математическом моделировании использовались модели стоимости и надежности.

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность технической системы как вероятность безотказной работы выражается в виде числа (0.1) или процента (0.100). Надежность в течение определенного времени $R(t)$ представлена соотношением успешно завершенных задач из общего числа задач. Сумма вероятностей работы и отказа технической системы, т. е. функции надежности $R(t)$ и функции отказа $F(t)$, равна: $R(t) + F(t) = 1$.

Считается, что срок службы технической системы подходит к концу, когда интенсивность отказов λ начинает усиливаться. Интенсивность отказов определяется соотношением отказов $f(t)$ и функции надежности: $\lambda(t) = f(t) / R(t)$, $f(t) = dF(t) / dt$.

На рис. 1 показан обобщенный график изменения интенсивности отказов в течение определенного времени, на котором выделены: I — период ранних отказов (происходит на стадии приработки системы); II — период нормальной работы системы (характеризуется наименьшей и приблизительно постоянной интенсивностью отказа); III — период интенсивного роста числа отказов в связи с усталостью материала и износом системы. У машин серийного производства, таких как бульдозеры, не бывает ранних периодов отказов. С момента ввода в эксплуатацию данных машин сразу начинается период нормальной работы (штриховая линия на рис. 1).

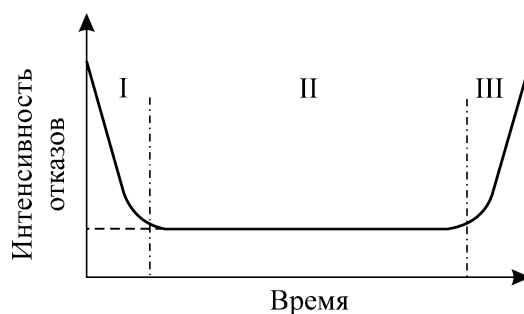


Рис. 1. Общий вид изменения интенсивности отказа во времени

Показатели надежности [13] определяются на основании данных о возникновении отказов и определении вероятности отказа. Для этого подходит двухпараметрическое распределение Вейбулла [14]:

функция надежности	$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$,
функция отказа	$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta}$,
функция плотности отказов	$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-(t/\eta)^\beta}$,
интенсивность отказов	$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$,
средняя наработка до отказа	$MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{t}{\beta}\right)$,
гамма-функция	$\Gamma(p) = \int_0^\infty t^{p-1} e^{-t} dt$, $p = 1 + \frac{1}{\beta}$,

где β — параметр формы; η — параметр масштаба.

Зависимость функции надежности и параметра формы β (распределение Вейбулла) показана на рис. 2.

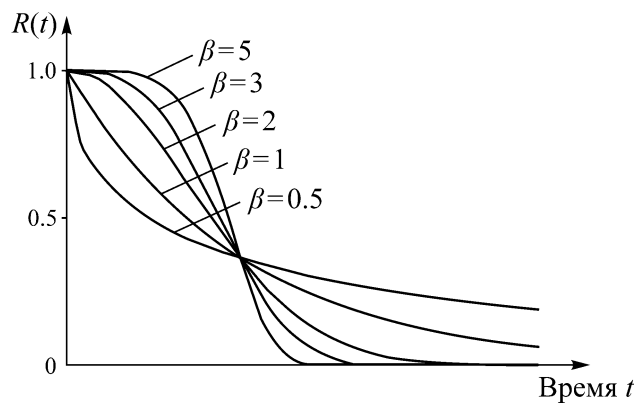


Рис. 2. Зависимость функции надежности при разных параметрах β от времени

В процессе управления жизненным циклом технических систем важно определить время, когда система должна быть заменена на новую: на рис. 1 — это время, когда интенсивность отказов быстро растет (период III), на рис. 2 — время, когда функция надежности $R(t)$ интенсивно падает.

КОНЦЕПЦИЯ ЗАТРАТНОЙ МОДЕЛИ

С экономической точки зрения жизненный цикл технической системы продолжается до тех пор, пока система экономически обоснованно выполняет заданную функцию цели. Срок экономической жизни и срок технической жизни систем не должны быть эквивалентными, иногда срок экономической жизни короче, чем технической. Причины могут быть разнообразными, например устаревшие характеристики машины, низкая производительность, энергоэффективность, стоимость эксплуатации, затраты на обслуживание машины и т. д. На основании отслеживания расходов, связанных с эксплуатацией технической системы, обеспечивается эконометрическая информация, необходимая для оценки экономически обоснованного жизненного цикла (рис. 3).

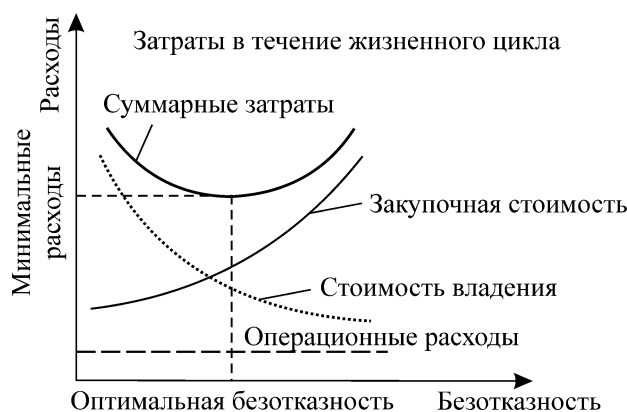


Рис. 3. Соотношение затрат и оптимального времени для замены технической системы

Экономическая логика указывает на необходимость поддержания баланса между эффективностью производства и расходами на эксплуатацию технической системы в целях достижения запланированного производства при минимальных расходах: производство (t/h) / расходы на эксплуатацию (d_c/h) $\rightarrow \max$ (d_c — денежная стоимость).

Часто используемой моделью по оценке стоимости владения и эксплуатационных расходов оборудования и машин является модель Caterpillar, включающая стоимость владения, операционные расходы и затраты оператора. При этом в стоимость владения вошли: стоимость приобретения машины; остаточная стоимость на замену машин — после периода амортизации; стоимость, подлежащая восстановлению путем эксплуатации (разница между стоимостью поставки и остаточной стоимостью машины); расходы на проценты; страховые расходы; налог на имущество. Операционные расходы включают: расходы на топливо; расходы на масло, смазочные материалы, охлаждающие жидкости, фильтры; расходы на профилактическое обслуживание (малые, средние и крупные ремонты), в том числе стоимость запчастей, расходных материалов и оборудования для ремонтов; расходы на корректирующее техническое обслуживание (поломки и остановки, не предусмотренные в плановых периодах обслуживания), расходы на запчасти, расходные материалы и оборудование для устранения поломок; затраты на рабочую силу по профилактическому и корректировочному обслуживанию, расходы на привлечение персонала по обслуживанию, устранению поломок и выполнению капитальных ремонтов; расходы на ходовые механизмы (на шинах, на гусеницах); прочие расходы (статьи износа).

С экономической точки зрения, в случае замены машины до истечения оптимального срока эксплуатации, упускается возможность полного использования ее производственных возможностей и, соответственно, финансовая прибыль. С другой стороны, замена машины после истечения оптимального срока приводит к увеличению производственных расходов и нерациональному использованию материальных средств, повышению потерь из-за остановок в работе, увеличению объема инвестиций в машину, в то время как ее производственные возможности не увеличиваются [15]. Оптимальный жизненный цикл машины, т. е. оптимальное время для ее замены наступает, когда общие расходы достигают минимума (см. рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предмет исследования — бульдозеры производителей Liebherr PR 752, Caterpillar D8R и Stalowa Wola TD25H, находившиеся в эксплуатации от 8 до 11 лет на открытых карьерах горнодобывающего бассейна «Колубара». Вместо оригинальной маркировки машин при выполнении анализа использованы условные обозначения Д1, Д2 и Д3, порядок которых не соответствует порядку приведения производителей. Двойственная оценка жизненного цикла машин проведена с применением затратной модели и модели надежности.

ТАБЛИЦА 1. Нарботка бульдозеров до отказа

Машина							
Д1				Д2		Д3	
Номер испытания	Нарботка до отказа, ч	Номер испытания	Нарботка до отказа, ч	Номер испытания	Нарботка до отказа, ч	Номер испытания	Нарботка до отказа, ч
1	972	44	16 419	1	2 257	1	1 904
2	1 159	45	16 807	2	2 625	2	4 443
3	1 457	46	17 126	3	3 072	3	6 374
4	1 655	47	17 473	4	4 937	4	8 095
5	1 755	48	17 797	5	6 361	5	10 733
6	2 145	49	18 381	6	7 651	6	11 855
7	2 697	50	18 702	7	8 547	7	14 011
8	2 999	51	19 077	8	9 875	8	15 233
9	3 190	52	19 348	9	10 171	9	16 586
10	3 456	53	19 608	10	10 472	10	17 227
11	4 366	54	19 666	11	11 196	11	17 951
12	4 397	55	20 086	12	12 683	12	18 385
13	4 730	56	20 210	13	13 123	13	18 784
14	5 510	57	20 940	14	13 804	14	19 196
15	5 946	58	21 300	15	14 212	15	19 528
16	6 309	59	21 684	16	14 601	16	19 919
17	6 601	60	22 107	17	15 011	17	20 712
18	6 961	61	22 548	18	15 892	18	21 077
19	7 356	62	22 945	19	16 044	19	21 462
20	7 750	63	23 309	20	16 207	20	21 848
21	7 771	64	23 503	21	17 561	21	22 090
22	7 873	65	23 732	22	17 961	22	23 467
23	8 244	66	24 017	23	19 105	23	23 892
24	8 595	67	24 300	24	19 523	24	24 418
25	8 951	68	24 599	25	19 870	—	—
26	9 132	69	24 904	26	20 342	—	—
27	9 529	70	25 261	27	20 820	—	—
28	9 807	71	25 569	28	21 230	—	—
29	10 005	72	25 972	29	21 784	—	—
30	11 322	73	26 137	30	22 304	—	—
31	11 661	74	26 523	31	22 544	—	—
32	12 035	75	26 903	32	22 959	—	—
33	12 224	76	27 653	33	23 282	—	—
34	12 283	77	27 885	34	23 621	—	—
35	12 609	78	28 154	35	23 880	—	—
36	13 054	79	28 429	—	—	—	—
37	13 458	80	28 824	—	—	—	—
38	13 739	81	29 117	—	—	—	—
39	14 689	82	29 491	—	—	—	—
40	14 948	83	29 865	—	—	—	—
41	15 198	84	30 136	—	—	—	—
42	15 627	85	30 604	—	—	—	—
43	16 052	—	—	—	—	—	—

Модель надежности. В результате многолетнего мониторинга работы бульдозеров осуществлен сбор информации о наработке до отказа (табл. 1) и получены параметры распределения Вейбулла, функций надежности, функций плотности отказов и средней наработки (табл. 2). Для машины ДЗ из-за незначительного количества данных использован метод медиан рангов [13].

ТАБЛИЦА 2. Функции надежности, частоты отказов и средняя наработка до отказа

Машина	Функция надежности $R(t)$	Функция частоты отказов $\lambda(t)$	Средняя наработка до отказа МТТФ, ч
Д1	$e^{-(t/18917.94)^{1.33}}$	$0.70 \cdot 10^{-4} (t/18917.94)^{0.33}$	17 387.48
Д2	$e^{-(t/19448.95)^{1.44}}$	$0.74 \cdot 10^{-4} (t/19448.95)^{0.44}$	17 671.31
Д3	$e^{-(t/19861.54)^{1.81}}$	$0.91 \cdot 10^{-4} (t/19861.54)^{0.81}$	17 654.92

Для проверки гипотезы полученного закона распределения использован тест Колмогорова-Смирнова, который применялся при анализе надежности реальных систем [16, 17]. Расчет проведен при уровне значимости $\alpha = 0.05$.

- Для машины Д1: $i = 7$, $D_n = 0.08$ и $n = 85$, приемлемое отклонение между эмпирическим и теоретическим значениями составляет $D_{n;\alpha} = D_{85;0.05} = 0.1475$. Так как $D_n = 0.08 < 0.147$, данные хорошо описываются распределением Вейбулла;

- Для машины Д2: $i = 6$, $D_n = 0.10$ и $n = 35$, приемлемое отклонение между эмпирическим и теоретическим значениями составляет $D_{n;\alpha} = D_{35;0.05} = 0.22425$. Так как $D_n = 0.10 < 0.22425$, данные хорошо описываются распределением Вейбулла;

- Для машины Д3: $i = 24$, $D_n = 0.21$ и $n = 24$, приемлемое отклонение между эмпирическим и теоретическим значениями составляет $D_{n;\alpha} = D_{24;0.05} = 0.26931$. Так как $D_n = 0.21 < 0.26931$, данные хорошо описываются распределением Вейбулла.

Графики функции надежности $R(t)$, частоты $\lambda(t)$ и плотности $f(t)$ отказа приведены на рис. 4. Средняя наработка до отказа МТТФ является соответствующим параметром для сравнения двух бульдозеров. Получены близкие значения данного параметра для всех бульдозеров, наилучшее среднее время наработки до отказа зафиксировано у бульдозера Д2 — 17 671.31 ч, а самый плохой результат у бульдозера Д1 — 17 387.48 ч.

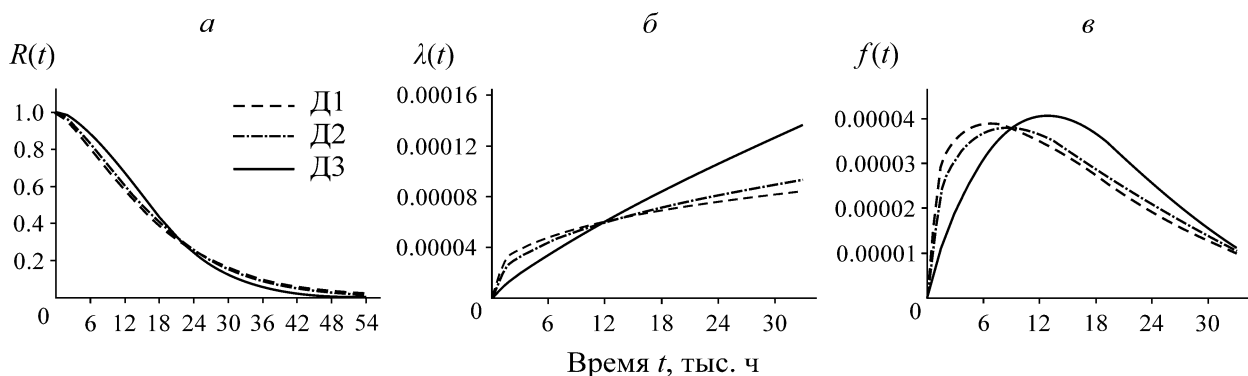


Рис. 4. Функции надежности (а), частоты (б) и плотности отказов (в) для машин Д1, Д2, Д3

Функция $R(t)$ на рис. 4а указывает на тот же вывод о надежности бульдозера. К примеру, в течение опорной наработки 15 000 ч вероятность правильной работы для Д1 составляет 48 %, для Д2 — 50 и для Д3 — 55 %. За 21 000 ч работы наибольшую надежность показал бульдозер Д3. При правильной работе машин с вероятностью 60 %, наработка до отказа у бульдозера Д1 составляет 11 400 ч, Д2 — 12 150 и Д3 — 13 700 ч. Вероятность 30 % правильного функционирования для всех этих машин достигается после 21 000 ч работы. На основании функции частоты отказов $\lambda(t)$ (рис. 4б) видно, что машина Д3 до 12 000 ч имеет низкую частоту отказов, после чего по сравнению с Д1 и Д2 она работает менее надежно. Основываясь на функции плотности отказов (рис. 4в), бульдозер Д3 в процессе работы до 9 000 ч имеет меньше отказов по сравнению с двумя другими машинами, однако после 9 000 ч работы число отказов превышает показатели по Д1 и Д2.

В интервале 19 000–23 000 ч работы бульдозеров функция надежности $R(t)$ (рис. 4а) уменьшается с 40 до 25 %, что свидетельствует о том, что наступает предпочтительное время для замены существующей машины на новую. На рис. 4б показано то же самое. Итак, машина Д3 является более надежной по сравнению с машинами Д1 и Д2.

Затратная модель. Затраты, собранные путем систематического мониторинга работы машин Д1, Д2 и Д3 на открытых карьерах горнодобывающего бассейна “Колубара”, обработаны до начала анализа в соответствии с Caterpillar методологией затратной модели. В табл. 3–7 представлены исходящие затраты модельного анализа с использованием следующих обозначений для расходов: C_v — стоимость владения; $C_{op} = C_{en} + C_{mf} + C_{пко}$ — операционные расходы; C_{en} — расходы на энергию привода; C_{mf} — расходы на масло, смазочные материалы, фильтры и т. д.; $C_{пко} = C_{змо} + C_{ро} + C_{рп} + C_{ргр}$ — расходы на профилактическое и корректирующее обслуживание; $C_{змо}$ — расходы на запчасти, расходные материалы и оборудование; $C_{ро}$ — затраты времени (часы работы) на обслуживание; $C_{рп}$ — затраты времени (часы работы) на устранение поломок; $C_{ргр}$ — затраты времени (часы работы) на генеральные ремонты; $C_{ро}$ — расходы оператора; $C_o = C_v + C_{op} + C_{ро}$ — общие расходы.

ТАБЛИЦА 3. Затраты на владение машинами, долл. США

Машина	Покупная стоимость машины	Общая наработка, лет	Фактическая наработка, моточас	Годовая амортизация	Аккумуляированная амортизация	C_v /моточас
Д1	425 830	11	30 604	34 663	381 288	12.46
Д2	476 714	8	23 880	38 804	310 436	13.00
Д3	556 073	8	24 418	45 264	362 115	14.83

Примечание. Ставка амортизации — 8.14 %.

ТАБЛИЦА 4. Расходы оператора машин, долл. США

Машина	Срок эксплуатации, лет	Фактическая наработка, моточас	$C_{ро}$ — кумулятивно	$C_{ро}$ /моточасы
Д1	11	30 604	454 474	14.85
Д2	8	23 880	333 626	13.97
Д3	8	24 418	333 626	13.66

ТАБЛИЦА 5. Операционные (эксплуатационные) расходы машин, долл. США

Период эксплуатации, лет	Наработка, моточас	C _{сеп}	C _{мф}	C _{пко}				Всего C _{оп}	C _{оп} /моточасы
				C _{змо}	C _{ро}	C _{рп}	C _{ргр}		
Машина Д1									
1	1 313	29 641	1 782	213	1 812	1 888	—	35 336	26.91
2	1 384	35 545	3 897	916	2 092	3 800	—	46 250	33.42
3	3 249	87 546	6 444	11 394	3 624	4 596	2 542	116 146	35.75
4	3 186	93 006	10 344	21 522	4 316	16 287	1 356	146 831	46.09
5	3 477	120 084	7 895	43 953	4 184	9 168	8 934	194 217	55.86
6	3 018	81 376	5 112	55 956	3 344	10 190	2 542	158 520	52.52
7	3 981	127 985	7 509	11 687	4 596	17 476	1 356	170 609	42.86
8	2 076	77 314	6 306	96 536	2 372	5 899	14 978	203 405	97.98
9	3 885	142 773	8 546	10 017	4 596	22 389	1 356	189 678	48.82
10	3 922	157 999	11 207	34 053	4 876	16 245	—	224 380	57.21
11	1 113	50 539	2 429	1 837	840	5 544	—	61 189	54.98
В среднем									
Всего	30 604	1 003 807	71 469	288 085	36 652	113 482	33 064	1 546 559	50.53
Машина Д2									
1	1 825	52 023	902	165	1 680	3 848	—	58 618	32.12
2	4 535	141 222	5 205	29 984	5 288	2 984	2 542	187 226	41.28
3	4 835	144 310	6 553	22 483	4 876	7 800	2 542	188 564	39.00
4	4 848	129 762	4 214	7 062	5 568	6 223	—	152 829	31.52
5	4 299	138 035	6 706	32 507	4 876	3 630	2 542	188 296	43.80
6	1 227	43 447	1 491	7 452	560	2 984	—	55 934	45.59
7	735	31 128	1 221	109 342	840	8 133	—	150 664	204.99
8	1 576	66 355	6 389	8 970	1 812	620	—	84 147	53.39
В среднем									
Всего	23 880	746 281	32 683	217 965	25 500	36 222	7 626	1 066 278	44.65
Машина Д3									
1	1 183	33 759	95	76	1 120	—	—	35 050	29.63
2	2 329	75 297	1 682	386	2 652	1 016	—	81 034	34.79
3	2 862	82 312	2 687	1 009	3 492	1 096	—	90 596	31.65
4	3 924	125 105	2 529	8 512	4 052	—	2 542	142 740	36.38
5	4 747	181 348	3 706	22 904	4 464	1 888	2 542	216 852	45.68
6	4 151	166 514	3 143	25 197	4 464	8 275	2 542	210 135	50.62
7	2 266	95 867	2 103	6 114	3 064	7 616	—	114 763	50.65
8	2 956	115 093	5 696	21 747	2 520	11 380	2 542	158 978	53.78
В среднем									
Всего	24 418	875 294	21 641	85 946	25 828	31 271	10 168	1 050 148	43.01

ТАБЛИЦА 6. Общие расходы на 1 моточас машины по годам эксплуатации машин, долл. США

Срок эксплуатации, лет	Машина					
	Д1		Д2		Д3	
	Наработка, моточас	C_o /моточасы	Наработка, моточас	C_o /моточасы	Наработка, моточас	C_o /моточасы
1	1 313	84.17	1 825	76.10	1 183	102.93
2	1 384	87.89	4 535	59.10	2 329	72.26
3	3 249	58.97	4 835	55.60	2 862	61.95
4	3 186	69.86	4 848	47.26	3 924	57.46
5	3 477	77.85	4 299	63.11	4 747	64.53
6	3 018	77.69	1 227	111.35	4 151	71.62
7	3 981	60.95	735	316.92	2 266	89.80
8	2 076	135.91	1 576	104.46	2 956	83.19
9	3 885	68.54	—	—	—	—
10	3 922	77.16	—	—	—	—
11	1 113	123.24	—	—	—	—
В среднем		77.84		71.62		71.50
Всего	30 604		23 880		24 418	

ТАБЛИЦА 7. Средние расходы на 1 моточас машины

Машина	Срок эксплуатации, лет	Всего моточасов	C_b	C_{op}	T_p	T_y
			долл. США/моточас			
Д1	11	30 604	12.46	50.53	14.85	77.84
Д2	8	23880	13.00	44.65	13.97	71.62
Д3	8	24 418	14.83	43.01	13.66	71.50

Результаты данного анализа показывают:

- машину Д1, покупной стоимостью 425 830 долл. США, сроком эксплуатации 11 лет, с общими средними расходами 77.84 долл. США/моточас, следует заменить после 7 лет работы (табл. 6);
- машину Д2, покупной стоимостью 476 714 долл. США, сроком эксплуатации 8 лет, с общими средними расходами 71.62 долл. США/моточас, следует заменить после 5 лет работы (табл. 6);
- машину Д3, покупной стоимостью 556 073 долл. США, сроком эксплуатации 8 лет, с общими средними расходами 71.50 долл. США/моточас, следует заменить после 6 лет работы (табл. 6).

На рис. 5 представлены сравнительные результаты обоих модельных подходов для машин Д1, Д2 и Д3.

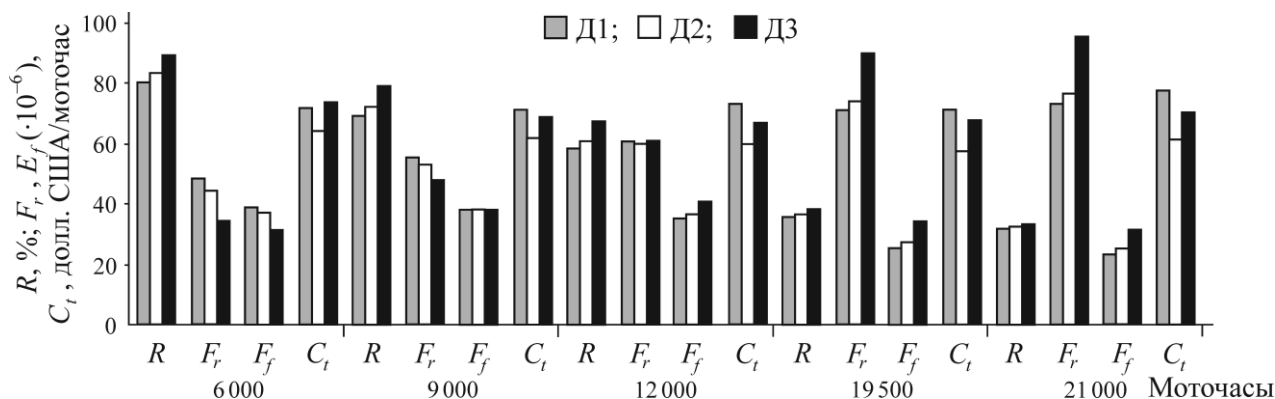


Рис. 5. Сравнительный анализ результатов двойственного анализа машин Д1, Д2, Д3: R — надежность; F_r — ставка неуспешности; F_f — ставка неисполнение; C_i — общие расходы на 1 моточас

ВЫВОДЫ

Исследованы две модели оценки жизненного цикла машин, одна из которых основывается на теории надежности, а другая — на стоимости жизненного цикла. Результаты обоих подходов показывают близость и большое совпадение оценок. Согласно модели надежности, после 19 000 ч работы у трех анализируемых машин она уменьшается с вероятностью 40 %, что указывает на время, когда желательно заменить машину на новую. Согласно затратной модели, наработка около 19 000 ч машиной Д1 достигается в течение 7 лет, машиной Д2 — 5 лет и машиной Д3 — 6 лет.

Результаты модели, основанной на теории надежности, соответствуют результатам модельного анализа, базирующегося на оценке стоимости жизненного цикла. Это является подтверждением хорошей подготовки исходных параметров и начальных установок для обеих моделей. Однако в связи с тем, что одна модель предпочитает теоретическую, а другая прагматическую основу, а сбор входных данных ввиду времени регистрации и сбора (несколько лет) подвержен методологической и метрической неравномерности, вывод заключается в том, что в целях надежности оценки жизненного цикла машины анализ не должен основываться только на одном модельном подходе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Z., Huang H. Z., and Du X. Reliability — based design incorporating several maintenance policies, *Eksploatacja i Niezawodnosc — Maintenance and Reliability*, 2009, 44 (4). — P. 37–44.
2. Peng W., Huang H., Zhang X., Liu Y., and Li Y. Reliability based optimal preventive maintenance policy of series-parallel systems, *Eksploatacja i Niezawodnosc, Maintenance and Reliability*, 2009, 42 (2). — P. 4–7.
3. Dababnehab A. and Ozbolatabc I. T. Predictive reliability and lifetime methodologies for circuit boards, *J. of Manufacturing Systems*, 2015, Vol. 37, Part 1. — P. 141–148.
4. Bugaric U., Tanasijevic M., Polovina D., Ignjatovic D., and Jovancic P. Lost production costs of the overburden excavation system caused by rubber belt failure, *Eksploatacja i Niezawodnosc — Maintenance and Reliability*, 2012, 14 (4). — P. 333–341.
5. Tanasijevic M., Bugaric U., Jovancic P., Ignjatovic D., and Polovina D. Relationship between the reliability and the length of conveyor rubber belt, *Proceedings of the 29th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, Beograd, 2012. — P. 274–277.
6. Abo-Alkheer A. K., El-Hami A., Kharmanda M. G., and Mouazen A. M. Reliability-based design for soil tillage machines, *J. of Terramechanics*, 2011, 48 (1). — P. 57–64.
7. **International** Electrotechnical Vocabulary, Dependability and Quality of service, IEC Standard, 1990, 50 (191).
8. Vujic S., Stanojević R., Tanaskovic T., Zajic B., Zivojinovic R., and Maksimovic S. Methods for optimization of the exploitation length of mining machines, *Electric Power Industry of Serbia, Academy of Engineering Sciences of Serbia and Montenegro, and Faculty of Mining and Geology University of Belgrade*, 2003. — 194 p.
9. Vujic S., Miljanovic I., Maksimovic S., Milutinovic A., Benovic T., Hudej M., Dimitrijevic B., Cebasek V., and Gajic G. Optimal dynamic management of exploitation life of the mining machinery: models with undefined Interval, *J. of Mining Science*, 2010, Vol. 46, No. 5. — P. 425–430.

- 10. Vujic S., Miljanovic I., Bosevski S., Kasas K., Milutinovic A., Gojkovic N., Dimitrijevic B., Gajic G., and Cebasek V.** Optimal dynamic management of exploitation life of the mining machinery: models with limited interval, *J. of Mining Science*, 2010, Vol. 46, No. 5. — P. 554–560.
- 11. International Electrotechnical Commission, IEC 300-3-3 Dependibility management.** P. 3. Application guide — Section 3: Life cycle costing, 1996. — 47 p.
- 12. Caterpillar Performance Handbook, Estimating Owning&Operating Costs,** Edition 26, 1995, Section 17, — 50 p.
- 13. Dhillon B. S.** Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety, Springer, 2008. — P. 21–22.
- 14. Chanseok Park,** Weibullness test and parameter estimation of the three-parameter Weibull model using the sample correlation coefficient, 2017, Vol. 24, No. 4. — P. 1661–1678.
- 15. Stanojevic R.** Dynamic Programming, The Institute of Economy, Belgrade, 2004. — 958 p.
- 16. Romeu J.** “Kolmogorov–Smirnov GoF test”, *RAC START*, 2003, 10 (3). — P. 1–6.
- 17. Dababnehab A. and Ozbolatabc I. T.** Predictive reliability and lifetime methodologies for circuit boards, *J. of Manufacturing Systems*, 2015, Vol. 37, Part 1. — P. 141–148.

Поступила в редакцию 11/III 2018