

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКОВ СЛУЖБЫ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ**

Сергей Васильевич Репин<sup>1</sup>, Сергей Аркадьевич Евтюков<sup>2</sup>, Ярослав Райчык<sup>3</sup>

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф., профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
Email: repinserge@mail.ru

<sup>2</sup> д-р техн. наук, проф., декан автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
Email: s.a.evt@mail.ru

<sup>3</sup> д.т.н., профессор, Ченстоховский политехнический институт

### **Аннотация**

Статья содержит результаты исследований изменения показателей транспортно-технологических машин в процессе эксплуатации: наработки, затрат, выручки, прибыли, рентабельности. Показано, что снижение наработки и увеличение затрат по времени эксплуатации описывается экспоненциальным законом. На основании изменения показателей составлены математические модели для определения оптимальных сроков службы машин по экономическим критериям. Описано применение информационной системы для сбора и обработки данных для использования в моделях.

Применение разработанной методики определения оптимальных сроков службы будет способствовать рациональному формированию парков машин.

### **Ключевые слова**

Транспортно-технологические машины, срок службы, эксплуатация, информационная система.

### **Введение**

Управление технической эксплуатацией сложных объектов, например, транспортно-технологических машин, представляет собой сложную многопараметрическую задачу, для помощи в решении которой разработан целый класс автоматизированных информационных средств — систем управления основными фондами (по западной классификации EAM-системы — Enterprise Asset Management). EAM-системы обеспечивают сбор и обработку эксплуатационной информации, автоматизируют процессы планирования технических обслуживаний и ремонтов, потребности в запчастях и других ресурсах. Одним из направлений развития EAM-систем является их интеллектуализация, заключающаяся в придании им возможности оптимизации производственных процессов за счет внедрения в информационные системы математических моделей, описывающих динамику основных параметров процессов.

На кафедре транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) разработаны математические модели оптимизации сроков службы техники (Repin, 2015; Репин и др., 2012). Использование этих моделей реализуется путем интеграции их с одной из лучших отечественных EAM-систем, программным комплексом (ПК) TRIM, разработанным специалистами НПП «СпецТек» (г. Санкт-Петербург) и адаптированным совместно с сотрудниками СПбГАСУ для условий эксплуатации транспортно-технологических машин (Репин и др. 2008).

Интеграция возможна двумя методами: путем экспорта данных во внешний программный модуль; внедрением программного модуля непосредственно в TRIM. В качестве внешнего модуля может служить программа, реализованная в математической среде, например, Excel, Mathcad, Statistica и др., в которую экспортируется необходимая информация из ПК TRIM. Данный метод наиболее прост в реализации, но требует установки дополнительного программного обеспечения и обучения пользователей. Метод внедрения программного модуля непосредственно в TRIM связан с его доработкой, но обеспечивает наибольшее удобство пользователей, и поэтому представляется наиболее перспективным.

Разработаны модели оптимизации и прогнозирования сроков службы машин по различным параметрам – экономическим, техническим, экономическим, экологическим. В настоящей статье описывается использование наиболее востребованных – экономических моделей оптимизации сроков службы. Для анализа и прогнозирования нужны данные по наработке машин, выручке и затратам.

### Предмет, задачи и методы

Предметом исследования является ТТМ, технические и экономические показатели эксплуатации которой (надежность, производительность, затраты) изменяются в зависимости от срока службы.

Задача, решаемая в статье — разработка методов обоснования сроков службы машин на основании эксплуатационной информации.

Используются методы статистического анализа и прогнозирования.

### Результаты и обсуждение

#### Описание моделей определения оптимальных сроков службы машин

Значения показателей изменяются по мере старения техники (Smith, 2003, Bujacsek, Slaviński, Grieger, 2013; 6. Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu, 2014; Репин, Зазыкин, Евтюков, 2016; Protasov, Nikolaychuk, 2011; Makhutov, Reznikov, 2015). Так, наработка машин падает вследствие увеличения времени простоев в ремонтах, а эксплуатационные затраты ( $Z_{пер}$ ) растут с интенсивностью 1,5...4 % в год. Эти изменения достаточно хорошо (с адекватностью 0,88...0,92) описываются экспоненциальной зависимостью с параметром  $\beta = 0,012...0,048 \text{ год}^{-1}$  (Репин, Зазыкин, Евтюков, 2016) (параметр старения по наработке  $\beta_t$  и по затратам  $\beta_z$ ):

$$T_P(t) = T_P(1) \cdot \exp(\beta_t \cdot t), \quad (1)$$

$$Z_{пер}(t) = Z_{пер}(1) \cdot \exp(\beta_z \cdot t), \quad (2)$$

где  $T_P(t)$ ,  $T_P(1)$  — суммарная продолжительность периодов времени пребывания машины в работоспособном состоянии в  $t$ -й и первый год эксплуатации соответственно;  $Z_{пер}(t)$ ,  $Z_{пер}(1)$  — переменная составляющая затрат (эксплуатационные затраты); в  $t$ -й и первый год эксплуатации соответственно;  $t$  — текущий возраст машины, год.

Основанием для расчета выручки  $B(t)$  от эксплуатации машины служит ее наработка, определяемая суммарной продолжительностью периодов времени пребывания машины в работоспособном  $T_P(t)$  в течение расчетного периода (года).

Возможны два основных варианта получения выручки:

предприятие-владелец техники сдает ее в аренду, тогда

$$B(t) = C_{маш-ч} T_P(t) \quad (3)$$

где  $C_{маш-ч}$  — цена машино-часа аренды машины;

предприятие-владелец само использует технику для производства работ, тогда выручка будет связана с производительностью машины  $Q(t)$ , ценой единицы продукции  $c$  и наработкой  $T_P(t)$ :

$$B(t) = \sum Q(t) \cdot c \cdot T_p(t) \cdot k_u, \quad (4)$$

где  $k_u$  — коэффициент использования потенциала машины (рабочего времени, мощности, грузоподъемности и т.п.).

Затраты имеют весьма сложную структуру. В упрощенном виде состав затрат на содержание и эксплуатацию парка машин, можно представить выражением:

$$Z(t) = Z_{\text{пост}}(t) + Z_{\text{пер}}(t). \quad (5)$$

Первое слагаемое экономисты рассматривают как условно-постоянные затраты, не зависящие от количества выпущенной продукции (отработанных машино-часов) за расчетный период.  $Z_{\text{пост}}(t)$  представляют собой в основном издержки владения техникой. Второе слагаемое — переменные затраты  $Z_{\text{пер}}(t)$ , возрастающие пропорционально объему продукции. Это затраты на эксплуатацию машины. Расчет затрат производится согласно нормативным документам. Так, для строительной и автотранспортной техники рекомендуется использовать «Методические указания» Госстроя России (ГОССТОРЙ РОССИИ, 1999).

Прибыль  $\Pi(t)$  рассчитывается как разница выручки  $B(t)$  и затрат  $Z(t)$ :

$$\Pi(t) = B(t) - Z(t). \quad (6)$$

Оптимальный срок службы машины может быть определен по минимуму удельных затрат, приходящихся на машино-час работы машины, максимуму удельной прибыли, заданному минимальному уровню рентабельности  $R_{\text{min}}$ .

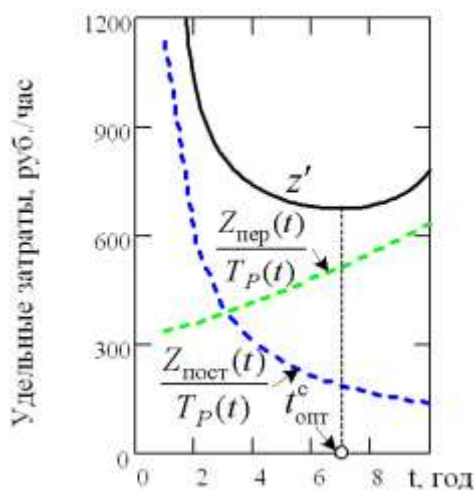


Рисунок 1. Изменение удельных затрат на эксплуатацию машины в зависимости от срока службы:  $t_{\text{опт}}^c$  - оптимальный срок службы машины

от срока службы:  $t_{\text{опт}}^c$  - оптимальный срок службы машины

Удельные затраты, приведенные к машино-часу эксплуатации определяются по формуле (рисунок 1):

$$z'(t) = \frac{Z_{\text{пост}}(t) + Z_{\text{пер}}(t)}{T_p(t)}. \quad (7)$$

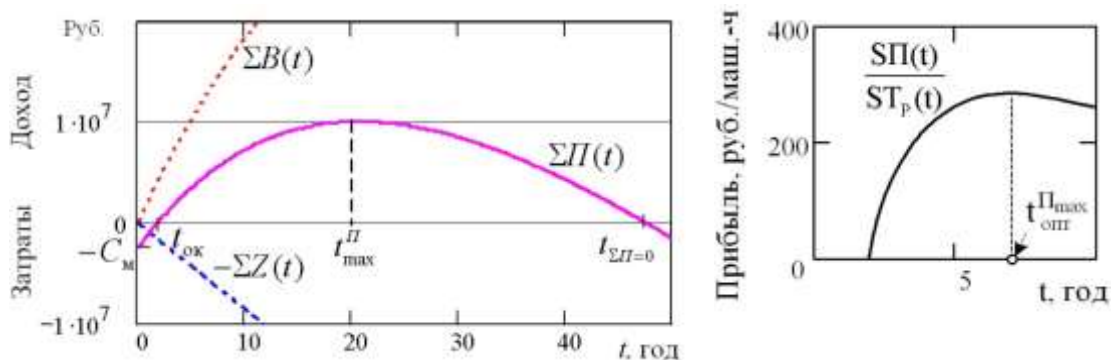
Рассмотрим динамику накопленной за срок службы машины прибыли. По мере старения машины значение выручки будет падать, т.к. согласно формуле (1) будет уменьшаться наработка машины в единицу времени. Затраты же будут возрастать в соответствии с выражением (2). В течение срока службы суммарная выручка  $SB(t) = \sum B(t)$  и суммарные затраты  $SZ(t) = \sum Z(t)$  составят суммарную (накопленную) прибыль от эксплуатации машины (рисунок 2, а):

$$S\Pi(t) = -C_M + SB(t) - SZ(t), \quad (8)$$

где  $C_M$  — стоимость приобретения машины.

График суммарной прибыли  $S\Pi(t)$  имеет четыре характерные точки в моменты времени: 0,  $t_{\text{ок}}$ ,  $t_{\text{max}}^{\Pi}$  и  $t_{S\Pi=0}$ . При  $t=0$   $S\Pi(t)=-C_M$ . До момента времени окупаемости  $t_{\text{ок}}$  значение суммарной прибыли остается меньшим нуля. Максимум  $S\Pi(t)$  достигается при  $t_{\text{max}}^{\Pi}$ . В этот момент становятся равными величины годовых выручки и затрат. Эксплуатация машины должна быть прекращена ранее времени  $t_{\text{max}}^{\Pi}$ . Дальнейшее использование машины будет приносить убыток, и к моменту  $t_{S\Pi=0}$  затраты на поддержание работоспособности старой машины «съедят» всю прибыль.

Таким образом, оптимальный срок службы машины находится в интервале времени от  $t_{ок}$  до  $t_{max}^{\Pi}$ . Более конкретно можно прогнозировать оптимальный срок службы по модели динамики удельной накопленной прибыли (рисунок 2, б).



а б  
Рисунок 2. Динамика накопленной прибыли  $S\Pi(t)$  (а) и удельной прибыли (б) за срок службы машины:  $SB(t)$ ,  $SZ(t)$ ,  $ST_p(t)$  — накопленные выручка, затраты и наработка;  $C_m$  — стоимость новой машины;  $t_{ок}$  — срок окупаемости;  $t_{max}^{\Pi}$  — срок службы по максимуму накопленной прибыли;  $t_{\Sigma\Pi=0}$  — срок службы, при котором затраты на поддержание работоспособности машины «съедают» всю прибыль;  $t_{opt}^{\Pi}$  — оптимальный срок службы по максимальному значению удельной накопленной прибыли

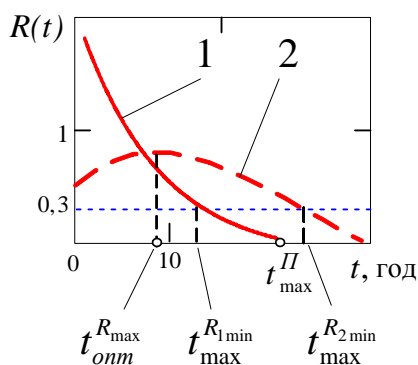


Рисунок 3. Определение срока службы по уровню рентабельности:

$t_{max}^{R_{1min}}$ ,  $t_{max}^{R_{2min}}$  – срок службы по минимально допустимому нормативному уровню рентабельности (0,3);  $t_{opt}^{R_{max}}$  – оптимальный срок службы по максимальному уровню рентабельности  $R_{max}$ ; линии 1 и 2 соответствуют равномерному и ускоренному (с коэффициентом два) методам расчета амортизационных отчислений

Дополнительную информацию по выбору срока службы может дать анализ уровня рентабельности эксплуатации машины:

$$R(t) = \Pi(t) / Z(t) \geq R_{min}, \quad (9)$$

который является одним из основных экономических показателей. Задавшись нижним значением  $R_{min}$ , например 0,3 (рисунок 3), получаем максимальный срок службы  $t_{max}^{R_{min}}$  по условию нижнего предела уровня рентабельности, который зависит от метода расчета амортизационных отчислений.

Модели определения сроков службы по минимуму удельных затрат и максимуму удельной прибыли (оптимальные значения примерно совпадают) целесообразно применять в случае наличия у эксплуатирующей организации средств для обновления парка машин. В этом случае можно будет выручить значительные суммы от продажи машины (рыночная стоимость снижается примерно

на 20% в год от текущего значения рыночной стоимости). Модель минимума уровня рентабельности применима для предприятий, испытывающих дефицит средств для приобретения новой техники.

### Использование ПК TRIM для анализа и прогнозирования наработки машин

Параметры  $\beta_t$  и  $\beta_z$  зависят от качества изготовления техники, условий эксплуатации и уровня совершенства системы технической эксплуатации (СТЭ) и для каждой единицы техники имеют свое определенное значение. Параметры  $\beta_t$  и  $\beta_z$  определяются на основе анализа статистической информации. Для сбора информации для расчета  $\beta_t$  можно использовать ПК

TRIM (рисунок 4), для расчета затрат — данные бухгалтерии (Репин и др., 2008; Репин, Бондаренко 2012).

По собранным за период наблюдений  $n$  лет, например, пять лет значениям  $T_p(t)$  из зоны анализа (рисунок 5), вычисляется среднее значение  $\beta_{tcp}$ :

$$\beta_{i_i} = \frac{-\ln[T_p(i)/T_p(1)]}{i}, \quad \beta_{tcp} = \frac{\sum_{i=2}^n \beta_{i_i}}{i} \quad (10)$$

По значению  $\beta_{tcp}$  прогнозируется наработка в последующие годы. Аналогично определяется  $\beta_{zcp}$ . При наличии данных по нескольким однотипным машинам можно строить усредненный прогноз.

Значение	Ед.	Дата ввода	Разница
23 517	Мото-часы	01.01.2010	667
22 850	Мото-часы	01.12.2009	573
22 277	Мото-часы	01.11.2009	653
21 624	Мото-часы	29.10.2009	0
21 624	Мото-часы	01.10.2009	471
21 153	Мото-часы	01.09.2009	317
20 836	Мото-часы	01.08.2009	678
20 158	Мото-часы	01.07.2009	697
19 461	Мото-часы	01.06.2009	623
18 838	Мото-часы	01.05.2009	704
18 134	Мото-часы	01.04.2009	684
17 450	Мото-часы	01.03.2009	632
16 818	Мото-часы	01.02.2009	671
16 147	Мото-часы	01.01.2009	16147
0	Мото-часы	01.01.2001	0

Рисунок 4. Окно счетчика наработки в программном комплексе TRIM

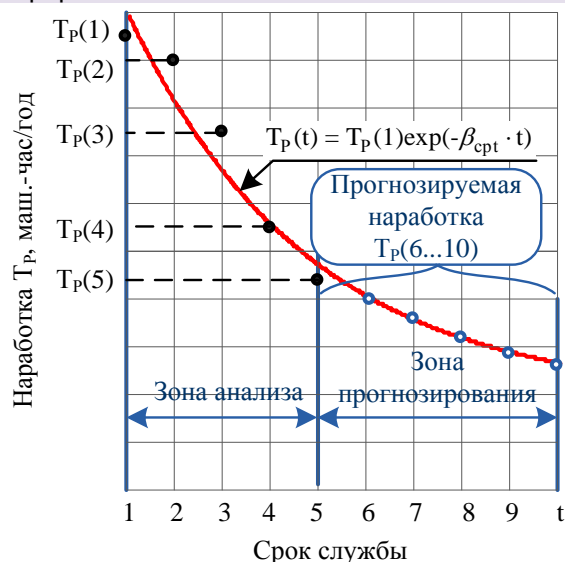


Рисунок 5. Схема к расчету  $\beta_{cpt}$  и прогнозирования наработки

Для анализа удобно использовать передачу данных из TRIM в Excel. Результаты обработки данных в Excel приведены на рисунке 6.

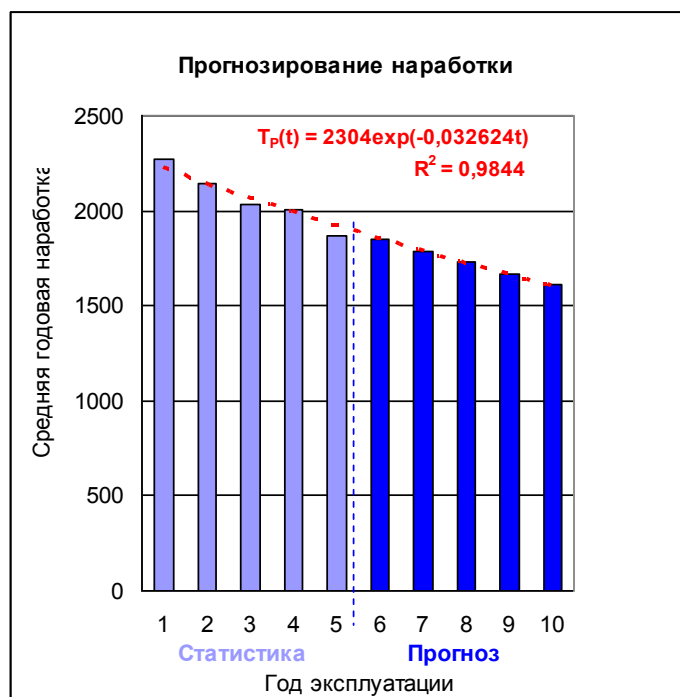


Рисунок 6. График изменения наработки и линия тренда

## Заключение

Представленная методика обработки эксплуатационной информации по наработке парка машин может служить основой для прогнозирования сроков службы не только машин, но и любых технических объектов. Ценность данной методики также заключается в том, что для прогнозирования требуется минимальное количество информации — наработка по периодам эксплуатации и эксплуатационные затраты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках научно-исследовательского проекта «Разработка методики формирования структурных элементов

## Литература

Bujaczek R, Sławiński K, Grieger A (2013) Agricultural Machines Maintenance And Repair Services In Western Pomerania. *Technical Sciences*, 16(1): 13–18. See [http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech\\_16\\_1/b02.pdf](http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech_16_1/b02.pdf) (accessed 10.05.2016).

Chernyavsky A, Shadchin A (2010) Evaluation of reliability of low damage probability calculations for unitary structures. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 39(4): 402–406.

Makhutov N, Reznikov D (2015) Application of scenario analysis in the assessment of structural reliability of complex technical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 44(8): 675–686.

Protasov A, Nikolaychuk O (2011) Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 40(1): 27–30.

Repin S (2015) Renewal Methods of Construction Machinery According to Technical and Economic Indicators. *Applied Mechanics and Materials*, 725–726: 990–995.

Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu (2014) Structural Reliability Assessment by Integrating Sensitivity Analysis and Support Vector Machine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. See <http://dx.doi.org/10.1155/2014/586191> (accessed at 10.05.2016).

Smith P (2003) Valve Selection Handbook: Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application. Gulf Professional Publishing.

ГОССТРОЙ РОССИИ (Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу) (1999) МДС 81-3.99: Методические указания по разработке сметных норм и расценок на эксплуатацию строительных машин и автотранспортных средств. Госстрой России, Москва, РФ.

Репин СВ, Бондаренко АВ (2012) Оптимизация периодичности замен узлов транспортных и технологических машин на основе информации по динамике параметров их технического состояния. *Вестник гражданских инженеров*, 2(31), с. 236–243.

Репин СВ, Зазыкин АВ, Евтюков СС (2016) Надежность и эффективность транспортно-технологических машин. Издательский дом «Петрополис», СПб, РФ.

Репин СВ, Рулис КВ, Зазыкин АВ, Крупин СА (2012) Методология обеспечения работоспособности транспортно-технологических машин и комплексов средствами технической эксплуатации. Монография. СПбГАСУ, СПб, РФ.

Репин СВ, Рулис КВ, Зазыкин АВ, Ховалыг НК (2008) Методика применения информационной автоматизированной системы управления технической эксплуатацией строительных машин и автотранспорта. СПГАСУ, СПб, РФ.