УДК 69.002.5:658.588.8:[876:004]

С.В.Репин (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

# Как усовершенствовать систему управления технической эксплуатацией машин на основе научного анализа и информационных технологий

В статье описывается стратегия организации использования строительных машин в соответствии с их уровнем их технического состояния (ТС), изменяющегося по мере старения машины и управляемого методами технической эксплуатации, основанными на индивидуальном подходе к каждой единице техники. Индивидуальный подход базируется на моделировании процессов изменения ТС по времени, оптимизации сроков службы машин. Стратегия реализована в автоматизированной системе управления технической эксплуатаций строительных машин, разработанной учеными СПбГАСУ и специалистами НПП «СпецТек».

Оптимальное управление эксплуатацией парка машин предусматривает его использование с учетом внешних условий применения, технического состояния (ТС), возможностей эксплуатационного предприятия проводить необходимый комплекс мероприятий по обеспечению работоспособности машин. Анализ теории и практики технической эксплуатации (ТЭ) строительных машин показывает, что развитие методов обеспечения работоспособности происходит в направлении совершенствования профилактической стратегии с контролем характеристик технического состояния, изменяющихся под воздействием внешних факторов. Благодаря такой стратегии система технической эксплуатации (СТЭ) *адаптируется* к конкретным условиям с целью получения максимальной эффективности от использования парка машин. Развитию методологии формирования адаптивной системы управления технической эксплуатацией строительных машин посвящена данная статья.

## Прибыль как показатель эффективности применения строительных машин

Эффективность любой системы определяется соотношением результата от ее применения и затрат на ее эксплуатацию. Показателем эффективности применения строительных машин может служить прибыль от их использования. Задачей оптимального использования техники является получения максимальной прибыли. Реализация итоговой прибыли от эксплуатации техники в виде функции времени определяется выражением [1]

$$П(t) = B(t) - Z(t) - У(t) \rightarrow П_{\max}, \qquad (1)$$

где: *B(t), Z(t)* – соответственно выручка и расходы от производственной деятельности за расчетный период; *У(t)* – величина ущерба, вызванная срывом нормального хода производственного процесса; *t* – возраст эксплуатируемого оборудования.

Хотя модель (1) представлена в детерминированном виде, в действительности неопределённость условий эксплуатации обусловливает стохастический характер ее составляющих.

Основной **доход** предприятие по эксплуатации строительных машин (ПЭСМ) получает за счет оказания услуг по предоставлению машин строительным организациям. Величина выручки определяется суммой произведения оплачиваемой наработки $T_i(t)$ каждой машины за расчетный период на цену машино-часа $Ц_{iм\text{-}ч}$, т.е. суммой выручки $B_i(t)$ от эксплуатации отдельных машин

$$B(t) = \sum B_i(t) = \sum T_i(t) \cdot Ц_{iм-ч}. \quad (2)$$

В случае, если ПЭСМ само подряжается на производство строительных работ, его выручка будет связана с производительностью машины $Q_i(t)$, ценой единицы продукции $c_i$ и наработкой $T_i(t)$:

$$B(t) = \sum Q_i(t) \cdot c_i \cdot T_i(t) \cdot к_{iu}, \quad (3)$$

где $к_{iu}$ - коэффициент использования потенциала машины (рабочего времени, мощности, грузоподъемности и т.п.).

**Затраты** имеют весьма сложную структуру. В упрощенном виде состав затрат, приходящихся на $i$-тую машину, можно представить выражением:

$$Z(t) = \sum Z_i(t) = \sum \left\{ \left[ A_i(t) + З_i + Z_{ПЭБi} + Z_{BCi} + H_i + Z_{пр} \right] + \left[ Z_{iГСМ}(t) + Z_{iTOP}(t) \right] \right\}, \quad (4)$$

где $A_i(t)$ - амортизационные отчисления; $З_i$ - зарплата машинистов; $Z_{ПЭБi}$ - затраты на содержание производственно-эксплуатационной базы; $Z_{BCi}$ - отчисления в вышестоящую организацию, учредителям и т.п.; $H_i$ - налоги; $Z_{пр}$ - прочие отчисления (на страховки, банковские проценты по кредитам, лизинговые платежи, разрешения, техосмотры и пр.); $Z_{iГСМ}(t)$ - затраты на горюче-смазочные материалы и рабочие жидкости; $Z_{iTOP}(t)$ - затраты на технические обслуживания и ремонты, в том числе на запчасти и быстроизнашивающиеся части (БИЧ).

Первое слагаемое выражения (4) в квадратных скобках экономисты рассматривают как условно-постоянные затраты $Z_{пост}(t)$, не зависящие от количества выпущенной продукции (отработанных машино-часов) за расчетный период (но это не значит, что $Z_{пост}(t)$ не зависят от среднего возраста парка машин). Второе слагаемое в квадратных скобках – переменные затраты $Z_{пер}(t)$, возрастающие пропорционально объему продукции.

**Ущерб** можно представить как сопутствующие потери, сопровождающие простои машин из-за отказов. Если отказ возникает вследствие плановых технических воздействий, то ущерб, как правило, не возникает, т.к. система заранее подготавливается к простою части оборудования. Внезапные же отказы сопровождаются простоем не только отказавшей машины, но и ресурсов, технологически связанных с данной машиной. Последствием отказов может быть также снижение качества продукции, ущерб в социальной, экологической и др. сферах. Большинство проявлений ущерба обычно можно оценить экономически, причем величина ущерба пропорциональна времени простоя $T_{inp}$ оборудования:

$$У(t) = \sum У_i(t) = \sum y_i \cdot T_{inp}(t), \quad (5)$$

где $y_i$ - величина ущерба в единицу времени. В общем случае $y_i$ может быть функцией $T_{inp}$.

Т.к. продолжительность простоев связана с интенсивностью отказов и временем восстановления, то ущерб, можно рассматривать как комплексный показатель надежности, характеризующий две ее составляющих – безотказность и ремонтопригодность. Т.о., модель (1) связывает технические, экономические и надежностные характеристики машины. Кроме того, величина ущерба зависит от характера выполняемой работы. Значит, данный подход позволяет ответить на вопрос – каков будет оптимальный уровень надежности машины для конкретного производственного задания, в зависимости от возможных экономических потерь или событий, оцениваемых в экономическом эквиваленте, вследствие внезапного отказа.

Задачу управления эффективностью применения строительных машин можно разбить на три подзадачи:

- определение оптимального уровня надежности машины с точки зрения получения максимальной прибыли;
- обеспечение оптимального уровня надежности машин средствами технической эксплуатации (ТЭ);
- использование машин в соответствии с их уровнем надежности.

**Модель оптимального уровня надежности машины**

Уровень ТС машин определяется с одной стороны законодательством, нормативами (безопасности, экологичности, эргономики, эстетики и прочими), с другой стороны технико-экономическими соображениями (производительности, экономичности, рентабельности, конкурентоспособности, материало- и энергоемкости и др.). Рассматривая технико-экономический аспект, можно подойти к оптимизации надежности машины с двух точек зрения: соотношения между затратами ресурсов на повышение надежности и ущербом, связанным с внезапными отказами (рис. 1); получения максимальной прибыли (рис. 2). Затраты на повышение надежности машины формируются на стадиях приобретения, обеспечения работоспособности (ТОиР, КР, резервирование).

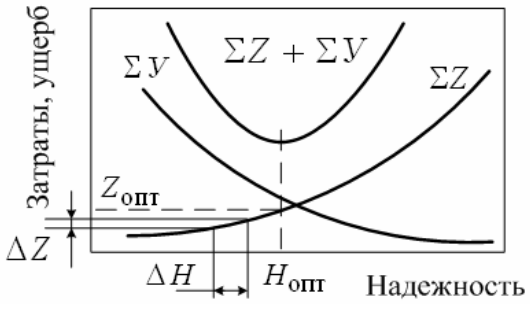



Рис. 1. Схема определения оптимальной надежности технической системы по минимуму суммы затрат ΣZ на обеспечение надежности и ущерба ΣУ

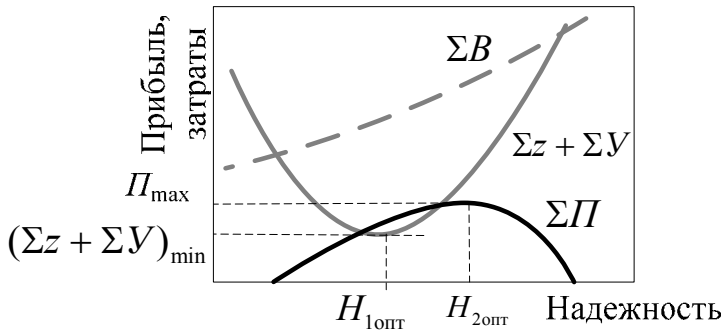



Рис. 2. Процесс определения оптимальной надежности технической системы: *ΣB*, *ΣП*, *ΣZ*, *ΣУ* – накопленные выручка, прибыль, затраты и ущерб от эксплуатации технической системы; $H_{1опт}$, $Z_{1опт}$ – оптимальные значения уровня надежности машины и затрат на его обеспечение соответственно по условию минимума суммы ущерба и затрат; $H_{2опт}$,

$Z_{2опт}$ – то же по условию максимума прибыли

Для практического использования моделей оптимальной надежности машин следует установить законы динамики показателей (надежности, выручки, прибыли, затрат и возможного ущерба) от срока службы, влияния надежности на экономические показатели, и, наконец, обосновать, какие показатели надежности применять и как на них воздействовать методами технической эксплуатации.

**Модель формирования показателей надежности и эксплуатации парка машин**

Согласно формулам (1) и (2) источником прибыли парка машин является наработка. Процесс формирования наработки парка машин, как результата и источника эффективности деятельности ПЭСМ, определяется периодами времени пребывания машин в различных состояниях (рис. 3), варьирование сочетанием которых позволяет вывести показатели использования парка машин (рис. 4). Буква «t» в скобках указывает на зависимость показателей от срока службы машины.

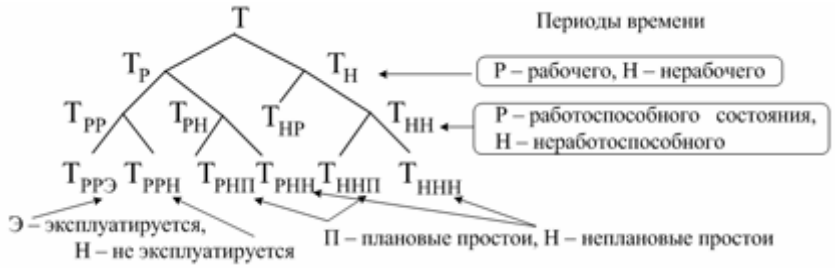


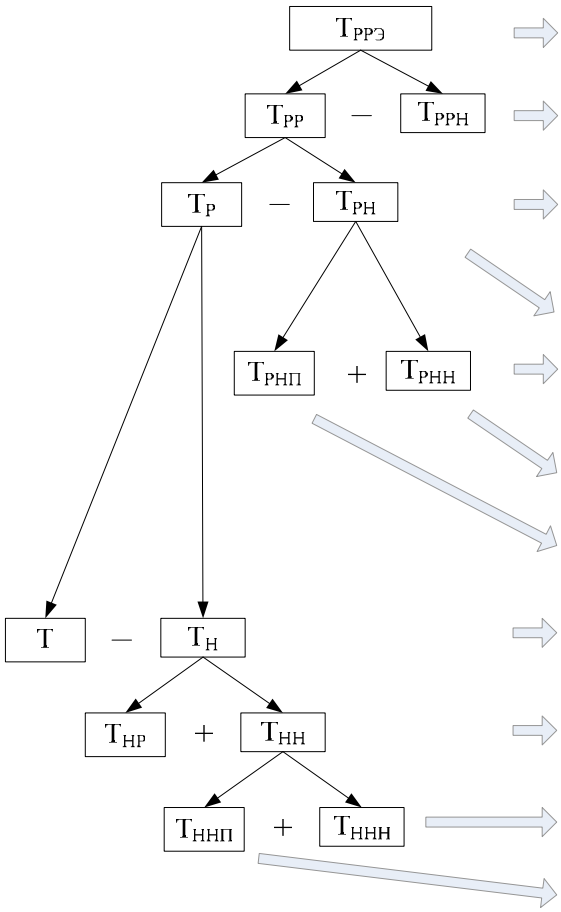

Рис. 3. Граф возможных состояний машины в процессе ее эксплуатации (по Прудовскиму Б.Д. и Ухарскому В.Б.)

Система коэффициентов характеризует:

- надежность машин через комплексные показатели надежности – коэффициенты готовности $К_Г$ и технического использования $К_{ТИ}$;
- работу ремонтной службы коэффициентами: простоев в плановых ТОиР в рабочее время – $К_{РНП}$, простоев в НР в рабочее время – $К_{РНН}$, простоев в плановых и неплановых ТОиР в рабочее время – $К_{РН}$;
- работу коммерческой службы через коэффициент использования работоспособных машин $К_{ИРР}$.

Динамика ТС машины, как функция срока службы, характеризуется изменением коэффициентов готовности и технического использования по мере старения машины. Эти коэффициенты характеризуют и качество работы системы технической эксплуатации, задача которой минимизировать продолжительность периода пребывания техники в неисправном состоянии $\left[T_{РНН}(t) + T_{РНП}(t)\right] \to \min$.

Последние три показателя характеризуют использование нерабочего времени машины для восстановления ее работоспособности, что весьма рационально. При этом показатели использования рабочего времени заметно улучшаются.




| Формула | Наименование коэффициента |
|---|---|
| $K_{СМ}(t) = \frac{T_{РРЭ}(t)}{8{,}2Д_{год}}$ | Сменности |
| $K_{ИРР}(t) = \frac{T_{РРЭ}}{T_{РР}(t)}$ | Использования работоспособных машин |
| $K_{ТИ}(t) = \frac{T_{РР}(t)}{T_{РР}(t)+T_{РНН}(t)+T_{РНП}(t)}$ | Технического использования |
| $K_{ИРВ}(t) = \frac{T_{РРЭ}}{T_{Р}(t)}$ | Использования рабочего времени машин |
| $K_{Г}(t) = \frac{T_{РР}(t)}{T_{РР}(t)+T_{РНН}(t)}$ | Готовности |
| $K_{РНН}(t) = \frac{T_{РНН}(t)}{T_{Р}}$ | Простоев в неплановых ТОиР в рабочее время |
| $K_{РНП}(t) = \frac{T_{РНП}(t)}{T_{Р}}$ | Простоев в плановых ТОиР в рабочее время |
| $K_{к} = \frac{T_{Р}}{T}$ | Использования календарного времени |
| $K_{НН}(t) = \frac{T_{НН}(t)}{T_{РН}(t)+T_{НН}(t)}$ | Использования нерабочего времени для проведения ТОиР |
| $K_{ННН}(t) = \frac{T_{ННН}(t)}{T_{РНН}(t)+T_{ННН}(t)}$ | Простоев в неплановых ТОиР в нерабочее время |
| $K_{ННП}(t) = \frac{T_{ННП}(t)}{T_{РНП}(t)+T_{ННП}(t)}$ | Простоев в плановых ТОиР в нерабочее время |

Рис. 4. Модель формирования показателей использования парка машин:
8,2 – продолжительность рабочей смены, ч; $Д_{год}$ – количество дней в году

**Динамика надежностных и экономических показателей эксплуатации строительных машин**

Анализ возрастных изменений характеристик строительных машин показывает уменьшение наработки $T_{PP}(t)$ и увеличение эксплуатационных затрат $Z_{пер}(t)$ 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 год$^{-1}$ (параметр старения по наработке $\beta_t$ и по затратам $\beta_z$) (рис. 4):

$$T_{PP}(t) = T_0 \cdot K_{\Gamma}(t), \quad (6)$$

$$K_{\Gamma}(t) = \exp(-\beta_t \cdot t), \quad (7)$$

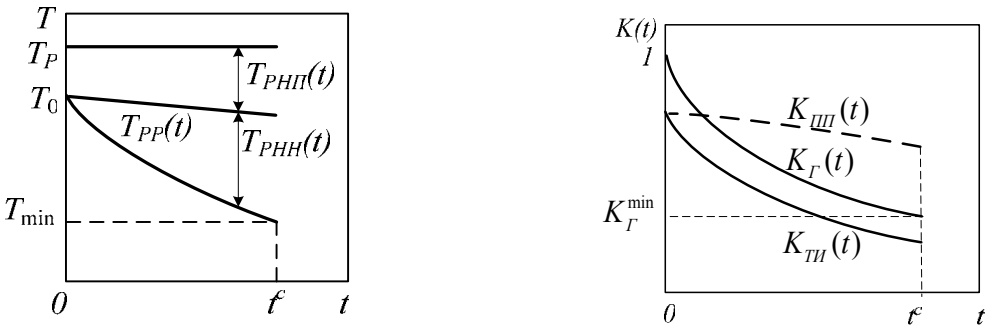
$$Z_{пер}(t) = Z_0 \exp(\beta_z \cdot t), \quad (8)$$

где $T_{PP}(t)$ – продолжительность пребывания машины в работоспособном состоянии в рабочее время; $T_0$, $Z_0$ – наработка и затраты за первый расчетный период новой машины соответственно; $K_{\Gamma}(t)$ – коэффициент готовности машины; $t$ – возраст машины.

Коэффициенты готовности и технического использования связаны через

коэффициент планируемого применения машины:

$$K_{ТИ}(t) = K_{Г}(t) \cdot K_{ПП}(t). \qquad (9)$$




а б

Рис. 5. Изменение характеристик работоспособности строительных машин от срока службы $t$ в процессе эксплуатации: а – наработки; б - показателей технической эксплуатации: $t^C$ – срок службы машины, соответствующий минимально допустимым коэффициенту готовности $K_{Г}^{\min}$ и наработке $T_{\min}$

Динамика показателей надежности (рис. 6, 7):

– количество неплановых ремонтов вследствие внезапных отказов

$$HP(t) = T_{РНН}(t) / T_{В}, \qquad (10)$$

где $T_B$ – среднее время восстановления работоспособности машины после отказа, ч;

– средняя наработка на отказ

$$T_{от}(t) = T_{РР}(t) / HP(t); \qquad (11)$$

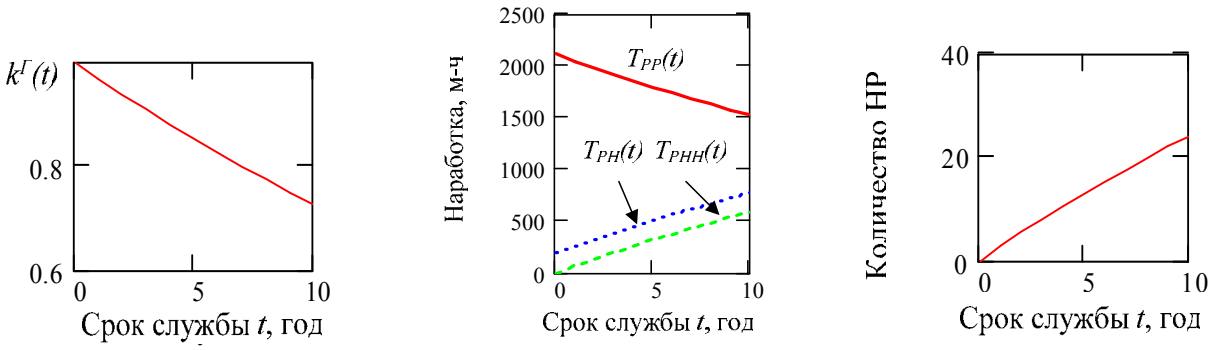
– приведенная интенсивность отказов

$$\Lambda(t) = 1/\left[T_{от}(t) + T_{В}\right], \text{ ч}^{-1}, \qquad (12)$$

– вероятность безотказной работы на отрезке времени $\Delta T$ (рис. 7, в)

$$P(t) = \exp\left[-\Lambda(t) \cdot \Delta T\right]. \qquad (13)$$

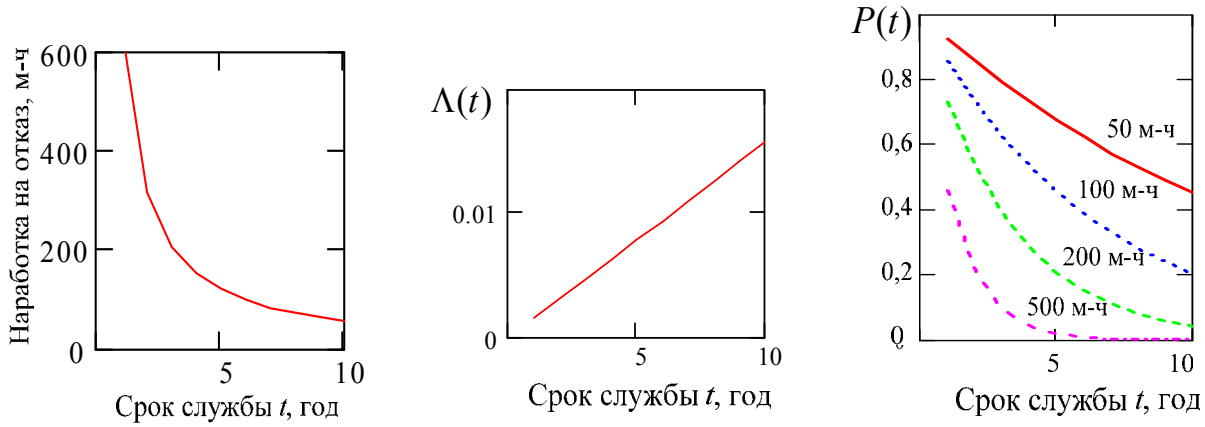
На рис. 6 и далее графически представлены результаты расчетов в Mathcad показателей для реальных условий эксплуатации экскаватора ЭО-4125 по данным Управления механизации №4 г. Санкт-Петербурга за 2002-2006 годы.




а) б) в)

Рис. 6. Зависимость показателей эксплуатации машины от срока службы: а) коэффициента готовности машины; б) годовой наработки $T_{РР}(t)$, продолжительности простоев в неисправном состоянии $T_{РН}(t)$ и, в том числе, простоев в неплановых ремонтах $T_{РНН}(t)$; в)

количества неплановых ремонтов $HP(t)$ в год




а) б) в)

Рис. 7. Зависимость показателей надежности от срока службы экскаватора: а) наработки на отказ $T_{от}(t)$; б) приведенной интенсивности отказов $\Lambda(t)$; в) вероятности безотказной работы $P(t)$ за определенный период времени $\Delta T$, равный 50, 100, 200, 500 м-ч

Представленные показатели надежности позволяют достаточно полно представить картину старения машины и показывают, какую отдачу можно ожидать от техники на определенном отрезке времени ее эксплуатации. Оптимальные значения данных показателей соответствуют оптимальному сроку службы машины.

**Модели оптимального срока службы машин**

Оптимальный срок службы машины может быть определен по минимуму удельных затрат, приходящиеся на машино-час работы машины, максимуму удельной прибыли, заданному уровню рентабельности.

Удельные затраты, приведенные к машино-часу эксплуатации определяются по формуле (рис. 8):

$$z'(t) = \frac{Zпост(t) + Zпер(t)}{T_{PP}(t)}. \qquad (14)$$

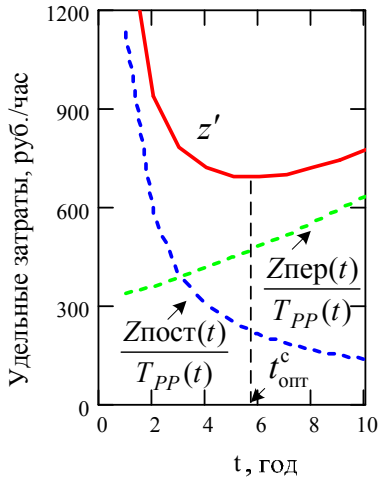
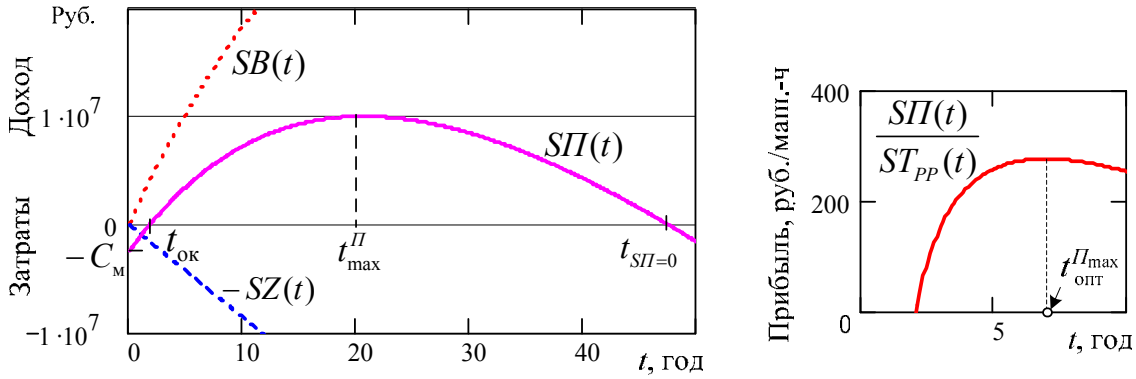



Рис. 8. Изменение удельных затрат на эксплуатацию машины в зависимости от срока службы

Рассмотрим динамику накопленной за срок службы машины прибыли. По мере старения машины значение выручки будет падать, т.к. согласно формуле (6) будет уменьшаться наработка машины в единицу времени. Затраты же будут возрастать в соответствии с выражением (7). 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 (рис.9):

$$SП(t) = -C_м + SB(t) - SZ(t). \qquad (15)$$




а б

Рис. 9. Динамика накопленной прибыли *SП(t)* (а) и удельной прибыли (б) за срок службы машины: *SB(t)*, *SZ(t)*,$ST_{PP}(t)$ – накопленные выручка, затраты и наработка; $C_м$ – стоимость новой машины; $t_{ок}$ – строк окупаемости; $t^{П}_{max}$ – срок службы по максимуму накопленной прибыли; $t_{SП=0}$ – срок службы, при котором затраты на поддержание работоспособности машины «съедят» всю прибыль; $t^{П\,max}_{опт}$ – оптимальный срок службы по максимальному удельной накопленной прибыли

График суммарной прибыли *SП(t)* имеет четыре характерные точки в моменты времени: 0, $t_{ок}$, $t^{П}_{max}$ и $t_{SП=0}$. При *t=0* *SП(t)*= -$C_м$, и до момента времени окупаемости $t_{ок}$ значение суммарной прибыли остается меньшим нуля. Максимума *SП(t)* достигает при $t^{П}_{max}$. В этот момент становятся равными величины выручки и затрат. Эксплуатация машины должна быть прекращена

ранее времени $t_{\max}^{П}$. Дальнейшее использование машины будет приносить убыток, и к моменту $t_{СП=0}$ затраты на поддержание работоспособности старой машины «съедят» всю прибыль.

Таким образом, оптимальный срок службы машины находится в интервале времени от $t_{ок}$ до $t_{\max}^{П}$. Более конкретно можно прогнозировать оптимальный срок службы по модели динамики удельной накопленной прибыли (рис. 9, а).

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

$$R(t) = П(t) / Z(t) \geq R_{\min}, \qquad (17)$$

который является одним из основных экономических показателей. Задавшись нижним значением $R_{\min}$, например 0,3 (рис. 10), получаем максимальный срок службы $t_{\max}^{R}$ по условию нижнего предела уровня рентабельности, меньший $t_{\max}^{П}$. Нетрудно заметить, что $t_{\max}^{R}$ намного превышает оптимальный срок службы, рассчитанный по минимуму удельных, приведенных к машино-часу, затрат.

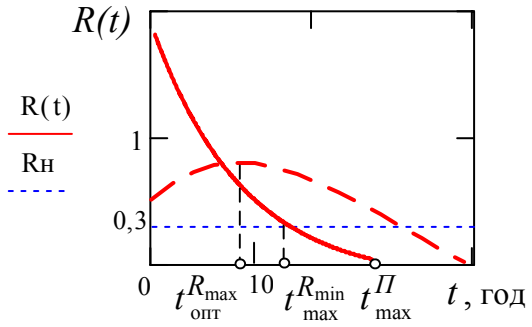



Рис. 10. Динамика уровня рентабельности за срок службы машины: $t_{\max}^{R\min}$ – максимальный срок службы по минимально допустимому уровню рентабельности $R_{\min}$; $t_{опт}^{R\max}$ – оптимальный срок службы по максимальному уровню рентабельности $R_{\max}$; линии 1 и 2 (б) соответствуют равномерному и ускоренному (с коэффициентом два) методам расчета амортизационных отчислений

Приведенная методика устанавливает связь между рядом основных показателей надежности и экономическими критериями эксплуатации строительных машин. Задавая один из показателей надежности и зная падение наработки по времени, а эта информация всегда фиксируется у эксплуатационников, можно определить не только остальные показатели, но и найти оптимальный срок службы машины или постановки на капитальный ремонт, а также основные экономические характеристики эксплуатации.

**Принципы построения системы технической эксплуатации строительных машин**

Рассмотренные модели эффективности, надежности, динамики технико-экономических показателей позволяют подойти к формированию оптимальной для конкретного эксплуатационного предприятия СТЭ, обеспечивающей максимальную эффективность применения строительных машин.

Методика формирования оптимальной СТЭ предусматривает:

– разработку плана мероприятий управления техническим состоянием машин в соответствии с разработанными моделями средствами ТЭ; составление плана мероприятий ТЭ должно осуществляться в

соответствии действующими нормативами, рекомендациями и с учетом конкретных условий эксплуатации строительных машин;
- использование машин в соответствии с их уровнем ТС;
- обоснование правильного сочетания состава мероприятий по обеспечению работоспособности машин, выполняемых собственными силами предприятия и с привлечением сторонних организаций по техническому сервису – выбор основывается на анализе количественного и качественного состава парка машин, ресурсов предприятия;
- обеспечение контроля качества выполнения операций ТЭ.

Основными нормативными документами (НД) для разработки плана мероприятий ТЭ являются инструкции заводов-изготовителей техники, отраслевые инструкции, «Рекомендации по организации технического обслуживания и ремонта строительных машин. МДС 12-8.2000», разработанные Госстроем России. В перечисленных НД приводятся: структура мероприятий ТОиР, периодичность, состав работ, трудоемкость, инструкции по планированию мероприятий. Причем указано, что режимы ТОиР должны корректироваться с учетом конкретных условий эксплуатации.

**Корректировка режимов ТОиР в соответствии с условиями использования техники**

Оптимальные состав и периодичность технических воздействий (ТВ) определяются динамикой состояния машины под воздействием внешней среды и внутренних факторов, а также требуемым уровнем ТС для конкретных условий работы. Корректировка режимов ТОиР, спланированных для средних условий эксплуатации в соответствии с нормативными документами, производится посредством корректирующих коэффициентов, учитывающих специфику работы конкретной машины.

Периодичность проведения различных видов технического обслуживания может быть выражена: в машино-часах, единицах календарного времени, единицах выполняемой продукции. При планировании сроков ТВ (ТО и ТР) в единицах календарного времени (дни, недели, месяцы) следует учитывать следующие соотношения [5]:

$$Д_р = T_н / \left(\kappa_{см} t_{см} \kappa_{ис}\right), \quad (18)$$

$$Д_к = T_н / \left(\kappa_{см} t_{см} \kappa_{ис} \kappa_{ик}\right), \quad (19)$$

В приведенных выражениях: $Д_р$ – дни работы, $Д_к$ – дни календарные, $T_н$ – нормируемая периодичность технического обслуживания, маш-ч; $t_{см}$ – нормируемая продолжительность смены, ч; $\kappa_{см}$ – средний коэффициент сменности; $\kappa_{ис}$ – коэффициент использования времени смены; $\kappa_{ик}$ – средний коэффициент использования времени года, отражающий целодневные простои по различным причинам, а также праздничные и выходные дни.

Допустимые отклонения сроков проведения периодических ТО допускаются в пределах ±10%.

Корректировка режимов плановых ТВ направлена на повышение роли и значения профилактических работ. Многообразие условий, а также изменение технического состояния элементов машин по мере изменения их наработки не позволяют использовать единые нормативы периодичности проведения технического обслуживания. В общем виде уточнение периодичности проведения различного вида ТВ может проводиться по формуле

$$T_i = T_i^н \prod_j \kappa_j \,, \qquad (20)$$

где $T_i^н$ – нормативная периодичность $i$-го технического воздействия; $\kappa_j$ – коэффициент, учитывающий $j$-тый фактор специфики эксплуатации конкретной машины.

Для машин, находящихся на гарантийном и фирменном обслуживании, а также поднадзорных государственным службам (ГИБДД, Гостехнадзор и др.), корректирующие коэффициенты выбираются согласно требованиям соответствующих организаций. Для остальных вариантов обслуживания набор факторов, описывающих специфику эксплуатации, практически не ограничен и может уточняться по мере развития системы ТОиР и накопления эксплуатационной информации. Наиболее влиятельные факторы, кроме уже учтенных в формулах (18), (19), согласно нашим исследованиям и мнению других ученых, отражаются следующими коэффициентами:

$\kappa_1$ – возрастной группы;

$\kappa_2$ – количества проведенных капитальных ремонтов;

$\kappa_3$ – зоны эксплуатации;

$\kappa_4$ – требуемого уровня надежности;

$\kappa_5$ – интенсивности нагрузки.

Учет влияния возраста машин на режимы ТОиР рассматривается практически всеми исследователями в области ТЭ. Наиболее часто применяются вероятностно-математические и технико-экономические методы обоснования режимов ТОиР. Так, периодичность проведения ТВ может определяться с учетом допустимого уровня: безотказности, коэффициента готовности (управление ТЭ с контролем уровня надежности); контролируемого параметра (управление ТЭ с контролем уровня параметров); технико-экономических показателей.

Определение периодичности ТР по допустимому уровню безотказности производится путем обоснования наработки машины, при которой вероятность отказа не превысит заданного значения:

$$F_{от}(T_{от} \le T_\gamma) \le F(T_\gamma), \;\; P_\gamma = 1 - F_{от},$$

где $T_{от}$ – наработка на отказ; $T_\gamma$ – гамма-процентная наработка на отказ, равная периодичности проведения ТР; $P_\gamma$ – допустимая вероятность безотказной работы.

Периодичность ТО будет определяться в этом случае пропорционально периодичности ТР согласно нормативам.

В третьей главе настоящей работы исследована динамика коэффициентов готовности и технического использования с возрастом машины. Поэтому в качестве корректирующего коэффициента $\kappa_1$ предлагается использовать

соотношение текущего $K_{ТИ}(t)$, определяемого по формуле (7), и начального значений $K_{ТИ}(0)$, равного 0,92…0,95:

$$\kappa_1 = \frac{K_{ТИ}(t)}{K_{ТИ}(0)}. \qquad (21)$$

Данный коэффициент будет показывать насколько быстрее приближается отработавшая определенный срок машина к допустимому уровню надежности по сравнению с новой.

Управление ТОиР по значению контролируемого параметра производится путем замера его текущего значения при диагностировании. Зная закон изменения контролируемого параметра можно предсказать ресурс исследуемого узла и назначить срок соответствующего техническому состоянию ТВ. Операции диагностирования согласно нормативным документам входят в состав мероприятий ТО. В последние десятилетия получили развитие средства встроенной диагностики, которые позволяют вести непрерывный контроль параметров. Весьма информативным является и органолептический контроль работоспособности машины, особенно выполняемый опытными машинистами.

Значения коэффициентов $\kappa_2$ и $\kappa_{3\,в}$ первом приближении могут быть приняты следующими [5]:

| **Наработка** | $\boldsymbol{\kappa_2}$ |
|---|---|
| До первого КР . . . . . | 1 |
| После первого КР . . . . . | 0,8 |
| **Зона эксплуатации** | $\boldsymbol{\kappa_3}$ |
| Центральная . . . . . | 1 |
| Субтропипки . . . . . | 0,9 |
| Северная . . . . . | 0,85 |
| Крайний Север . . . . . | 0,8 |

Расчет рентабельности использования машины позволяет принять допустимым коэффициент готовности машины, равный 0,75…0,80. Вероятность безотказной работы принимается в соответствии с заданной продолжительностью работы на объекте по формуле (13), которой соответствует определенное значение Кг. Если требуется более высокий уровень надежности, определяемый значением коэффициента готовности, равным Ктреб, то это учитывается коэффициентом $\kappa_4$:

$$\kappa_4 = 0,75 / K\text{треб}. \qquad (22)$$

Учет интенсивности нагрузки машины в течение смены можно проводить по данным сменных рапортов, заполняемых машинистами, а также по значениям коэффициента перехода от мото-часов, фиксируемых счетчиком, к машино-часам, отражающих работу под нагрузкой.

**Оценка фактического уровня СТЭ машин**

Оценку качества проведения каждого ТВ, работы каждого подразделения СТЭ «Методические указания по разработке и внедрению системы управления качеством эксплуатации строительных машин» [6], разработанные Госстроем России, предлагают производить путем сравнения фактического и базового

значений показателя качества выполнения отдельных операций. Данное предложение трудно применить на практике, т.к. не определен сам порядок измерения качества операции и значения базовых уровней качества.

Для оценки фактического уровня технической эксплуатации машин проф. Э.А.Сухарев [7] предлагает использовать пять основных показателей:

- качество технического обслуживания (ТО),
- качество текущего ремонта (ТР),
- качество очистки масла и топлива (ОМТ),
- квалификация машинистов-операторов (КМО);
- качество хранения техники (ХТ).

В свою очередь, каждый показатель зависит от нескольких определяющих факторов $d_j$, диапазоны изменения которых соответствуют одному из трех возможных уровней эксплуатации машин – высокому, среднему, низкому.

В зависимости от указанных уровней эксплуатации численные значения определяющих факторов принимаются равными 0,95; 0,75; 0,50. В качестве примера в табл. 1 и 2 приводится перечень факторов $d_j$ и диапазоны их изменения для двух основных показателей – качества ТО и качества ТР.

Таблица 1

Качество ТО

| № | Определяющий фактор $d_j$ | Уровень эксплуатации | | |
|---|---|---|---|---|
| | | высокий | средний | низкий |
| 1. | Соблюдение периодичности ТО (отклонение в %) | до ±10% | до ± 25% | > ± 25% |
| 2. | Полнота выполнения операций ТО | до 100% | 70 ...90% | < 70% |
| 3. | Качество выполнения ТО (по 5-бальной системе) | 4…5 | до 3 | <3 |
| 4. | Обеспеченность средствами ТО и ТД (единиц на 100 машин) | 1.9...2.8 | 1,5...2,3 | <1,5 |

Таблица 2

Качество ТР

| № | Определяющий фактор $d_j$ | Уровень эксплуатации | | |
|---|---|---|---|---|
| | | высокий | средний | низкий |
| 1. | Качество проведения ТР (по 5-бальной системе) | 4…5 | До 3 | <3 |
| 2. | Обеспеченность запасными частями | 90…100% | 70... 90% | < 70% |
| 3. | Обеспеченность летучками (единиц на 100 машин) | 2,2...2,5 | 1.7...2.2 | <1,7 |
| 4 | Средний разряд слесарей-ремонтников | свыше 4 | 3…4 | <3 |

Количественное значение $i$-го основного показателя $K_i$ находится из выражения

$$K_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^{m} d_j}\,, \qquad (23)$$

где $m$ - число определяющих факторов $i$ -го показателя; $d_j$ - численное значение $j$-го определяющего фактора $i$-го показателя (по уровню эксплуатации).

Согласно нашим исследованиям, средние значения $K_i$, характеризующие уровень технической эксплуатации машин в строительных организациях г. Санкт-Петербурга, соответственно равны:

$$\overline{K}_{TO} = 0,6\,,\ \overline{K}_{TP} = 0,7\,,\ \overline{K}_{OMT} = 0,5\,,\ \overline{K}_{KMO} = 0,7\,,\ \overline{K}_{XT} = 0,6\,.$$

Таким образом, только показатели ТР и КМО соответствуют среднему уровню технической эксплуатации машин, остальные находятся на низком уровне.

Самое малое значение $K_i$ соответствует качеству ОМТ. Действительно, во многих управлениях топливо чистота гидравлических масел находится на весьма низком уровне.

На основании анализа основных показателей можно рассчитать так называемый обобщенный уровень эксплуатации $K_{об}$ по каждой марке машины

$$K_{об} = \sqrt[R]{\prod_{i=1}^{R} K_i}\,, \qquad (24)$$

где $R$ - число основных показателей ($R$=5).

Для УМ г. Санкт-Петербурга среднее значение $\overline{K}_{об} = 0,6$, что соответствует низкому уровню технической эксплуатации.

Лучшие показатели качества проведения регламентных ТВ имеют машины, подконтрольные Гортехнадзору, на автомобильном шасси, а также находящиеся на гарантии. Высокие показатели качества ТОиР имеют машины, обслуживаемые специализированными сервисными организациями.

Данная методика оценки уровня СТЭ включена в состав информационно-программного комплекса «Информационная автоматизированная система управления технической эксплуатацией» (ИАСУ ТЭ) строительных машин.

**Модель управления использованием техники в соответствии с уровнем ее надежности**

Адаптивная стратегия ТЭ машины предусматривает решение двух основных задач: управление техническим состоянием и применение машины в соответствии с ее ТС.

Управление ТС машин включает в себя комплекс воздействий: техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), обеспечение работ на объектах (ОРО), материально-техническое обеспечение (МТО).

Наиболее прогрессивная стратегия ТОиР – по состоянию, может осуществляться двумя методами в зависимости от контролируемого показателя: с контролем уровня надежности и с контролем параметров.

Вторая задача ТЭ – оптимальное использование машин в соответствии с их ТС, состоит в распределении техники по объектам работы, соблюдая соответствие

уровня надежности (УН) машин требуемому уровню надежности для конкретного объекта. Превышение УН над требуемым повлечет лишние затраты на обеспечение надежности машин. Недостаточный УН вызовет возникновение ущерба из-за простоев.

Схема управления использованием техники по УН представлена на рис. 11. Контроль УН производится по значению коэффициента готовности оператором (3). Коэффициент готовности машины $Кг_i$ не должен быть меньше требуемого для j-го объекта $Кг_j$. В случае выполнения этого условия машина отправляется на объект работы. В противном случае производится оценка целесообразности повышения $Кг_i$ методами ТЭ по уровню рентабельности $R_i$ машины оператором (5). Если рентабельность ее использования превышает минимально допустимый уровень $R_{min}$, то производится повышение работоспособности методами ТЭ – оператор (6). Если $R_i < R_{min}$, то следует избавиться от нерентабельной машины средствами оператора (7).

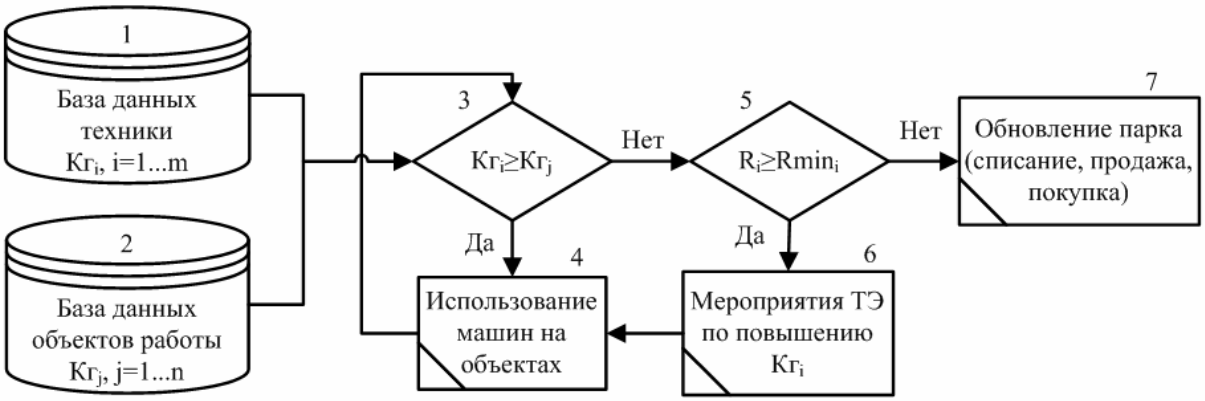



Рис. 11. Схема управления использованием техники в соответствии с уровнем ее надежности

Контроль УН в процессе использования машины производится оператором (3) путем сбора эксплуатационной информации по отказам, затратам, наработке и обработки с помощью приведенных выше математических моделей. Контроль параметров технического состояния узлов машины осуществляется посредством диагностирования в процессе использования машины и проведения мероприятий ТОиР.

По результатам диагностирования проводится комплекс мероприятий по обеспечению работоспособности машин оператором (6). Значения контролируемых параметров служат основой для оперативного планирования мероприятий ТОиР, уровень надежности – тактического, путем введения корректирующих коэффициентов режимов ТОиР.

По окончании работы каждого оператора информация о машине и состоянии дел на объекте работы поступает в соответствующие базы данных.

**Модель управления техническим состоянием машины**

На кафедре транспортно-технологических машин СПбГАСУ совместно с НПП «СпецТек» разработана и внедрена в Управлениях механизации г. Санкт-Петербурга информационная автоматизированная система управления

технической эксплуатацией (ИАСУ ТЭ) строительных машин. Управление ТЭ происходит по замкнутой схеме (рис. 12) с комбинированным контролем – уровня надежности и параметров технического состояния машин.

Схема работает следующим образом. От технического объекта (ТОб) в процессе его работы поступают на БОС сигналы о состоянии ТОб, изменяющемся под воздействием внешней среды (данные технической диагностики, информация об отказах, потребность в эксплуатационных материалах и т.п.), и характере использования (наработка, интенсивность работы, нагрузочные режимы, расход эксплуатационных материалов, погодные условия и т.д.). Эта информация поступает от машинистов, механиков, обслуживающего персонала.

БОС сравнивает результаты диагностики с допустимыми значениями диагностических параметров, обрабатывает эксплуатационную информацию и выдает данные на БУ для принятия решения, например, провести неплановый ремонт узла, доставить ГСМ, направить резервную машину для замены отказавшей, подготовить узел для замены и т.д.

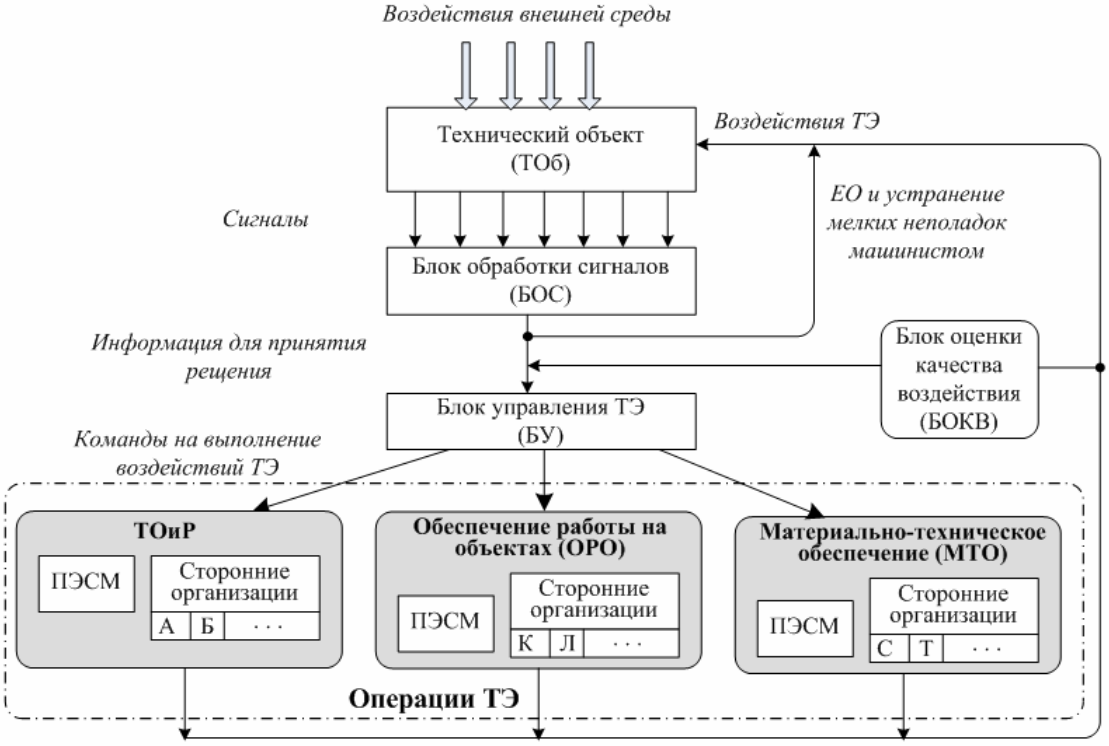



Рис. 12. Функциональная схема управления обеспечением работоспособности ТОб

Функции БОС обычно выполняют диспетчер, механик участка эксплуатации и работник планово-технического отдела (ПТО). Механик и работник ПТО составляют заявку на выполнение воздействия (причем, если воздействие плановое, то можно обойтись и без механика) и подают главному инженеру для утверждения.

Воздействия могут проводиться собственными силами предприятия по эксплуатации строительных машин (ПЭСМ) или с привлечением сторонних организаций. В случае проведения работ силами ПЭСМ заявка в виде наряда на

работы поступает к начальнику ремонтной службы, который распределяет работы по исполнителям. Эти работы и есть команды на выполнение воздействий. В случае привлечения сторонней организации действуют согласно договора сервисного обслуживания.

Обеспечение работы на объектах помимо выездных плановых и неплановых операций ТОиР включает: доставку ГСМ, транспортирование машин, резервирование отказавшей техники. Причем оптимизация комплекса работ по возобновлению работы отказавшей машины производится в соответствии с ее техническим состоянием и требуемым уровнем надежности.

На выполнение работ по ТОиР составляются следующие ремонтные документы: диагностическая карта, ведомость работ ТО, ремонтная ведомость. В этих документах перечислены операции ТЭ, указаны контролируемые параметры. По окончании работ заполненные исполнителями документы предъявляются начальнику ремонтной службы для проверки полноты и качества воздействий и сдаются в ПТО для учета работ и затраченных ресурсов. Таким образом выполняются функции БОКВ.

**Информационная автоматизированная система управления (ИАСУ) технической эксплуатацией.** Все описанные мероприятия по организации ТЭ производятся с применением ИАСУ, которая имеет модульную структуру. Типовой набор для ПЭСМ содержит следующие модули:

– *Техобслуживание* (учет наработки машин, отказов, затрат, планирование работ по обслуживанию и ремонту, формирование ремонтной и эксплуатационной документации);

– *Каталог* (описание структуры парка машин, создание электронного справочника запасных частей и материалов, запись в базу данных графических изображений узлов оборудования, ведение справочников производителей и поставщиков);

– *Склад* (формирование заявок на закупку запасных частей и материалов, оформление складских приходных документов, размещение запасных частей по местам хранения, учет остатков складских запасов, списание запасных частей при выполнении работ по техобслуживанию, формирование актов инвентаризации и списания);

– *Документооборот* (создание электронной эксплуатационной и ремонтной документации, разработка новых инструкций, параллельное ведение электронной и бумажной документации).

– *Администратор* (содержит справочники «Сотрудники», «Штатное расписание», «Должностные инструкции», распределяет производственные функции и режимы доступа в ИАСУ).

Система практически полностью обеспечивает автоматизацию управления основными процессами эксплуатации, обслуживания и ремонта строительных машин, материально-технического обеспечения. ИАСУ позволяет [3]:

– реализовать современные концепции эксплуатации техники: такие, как информационная поддержка жизненного цикла продукта (CALS-

технологии); интегрированная логистическая поддержка; тотальное управление качеством;

- сформировать наиболее эффективную на данный момент – индивидуальную стратегию обеспечения работоспособности каждой единицы техники;
- построить систему технического обслуживания и ремонта техники, оптимальную для конкретного предприятия.

Функциональная схема ИАСУ состоит из двух основных частей – программной части и базы данных. Программная часть выполняет основные функции по управлению ТОР (планирование, обеспечение ресурсами, сбор и анализ информации, контроль, прием и передача данных), оперируя информацией, поставляемой базами данных (рис. 13).

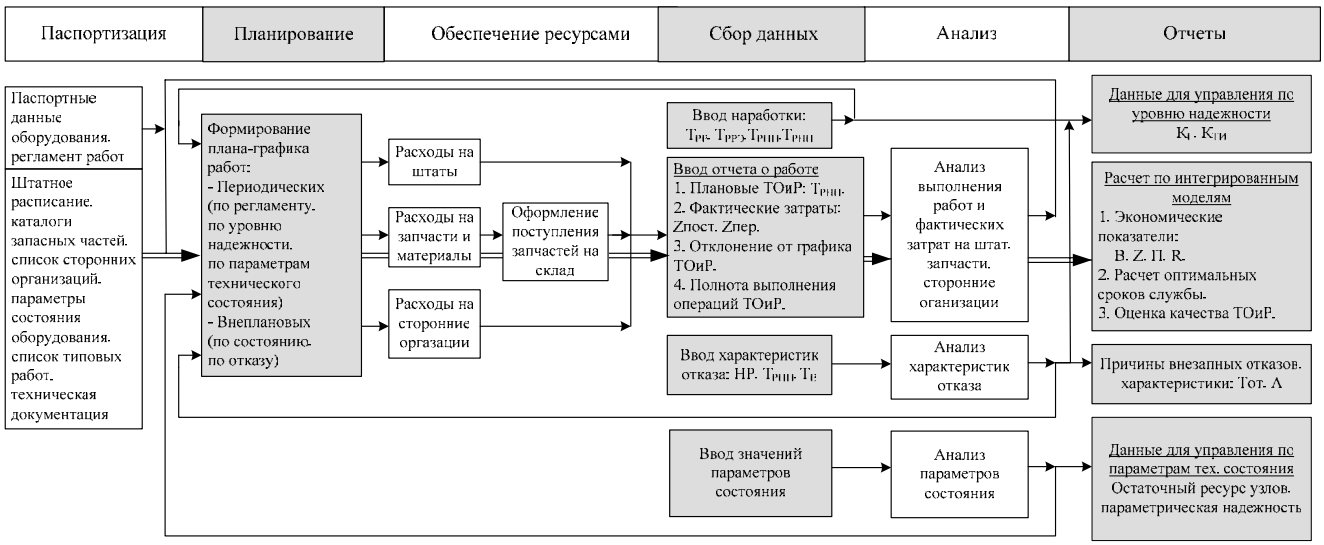



Рис. 13. Функциональная схема автоматизированной системы управления ТЭ

Процесс паспортизации (см. рис. 13.) представляет собой разработку базы данных, который продолжается и при эксплуатации ИАСУ. Он включает в себя:

- основные данные об оборудовании (код, наименование, тип, серийный номер, производитель, поставщик, владелец, ответственный за эксплуатацию, дата изготовления, дата ввода в эксплуатацию, технические характеристики, графическое изображение, местоположение);
- регламентные работы, при описании которых используется: кодировка, наименование, принадлежность к разделу классификатора работ, документы, описывающие методику проведения работы, ответственный за проведение работы, периодичность проведения работы по наработке или календарным периодам;
- счетчики наработки;
- контролируемые параметры оборудования (наименование, номинальное значение, нижние и верхние допустимые границы);

- запасные части оборудования (наименование по каталогу, каталожный номер, дополнительные данные каталога запчастей, количество необходимое для проведения каждой планируемой работы);
- документация на оборудование (технические описания, инструкции, отчетные формы, заполняемые при проведении работ и другие документы).

В БД включены графические изображения, содержащие *активные зоны* (англ. Hotspots – т.н. «горячие» области). Каждая такая зона связывается либо с определенной запасной частью, входящей в узел, либо с другим графическим изображением. Пользователь может перемещаться при помощи активных зон от одного изображения к другому, а также выбирать запасные части, непосредственно указывая мышью на активные зоны, присоединенные к картинке. Данная функция значительно облегчает работу по планированию, расходованию, учету и заказу запчастей, снижает вероятность ошибок при формировании заказов.

Программная часть представлена модулем «Техобслуживание» и занимает главное место в ИАСУ. При работе к модулю подключаются необходимые каталоги, базы данных, документация. Основные функции модуля:

- описание и ведение структуры парка машин и оборудования (в общем случае – основных производственных фондов) (паспортизация);
- планирование работ по техническому обслуживанию и ремонтам с учетом специфики каждой машины путем введения корректирующих коэффициентов;
- заказ запасных частей для запланированных работ;
- ведение журнала выполненных работ;
- учет наработки оборудования по счетчикам;
- регистрация текущих значений технических параметров;
- анализ отказов, их видов и последствий;
- ведение технической и ремонтной документации, инструкций;
- анализ качества выполнения процессов ТОР.

**Опыт внедрения ИАСУ.** Опыт практического применения позволяет выделить четыре основных этапа внедрения ИАСУ. *Первый этап* предусматривает анализ организации системы технической эксплуатации (СТЭ) на предприятии с точки зрения наиболее рационального «вписания» ИАСУ в структуру СТЭ. Первый этап заканчивается разработкой технического задания на НИР.

*На втором этапе* устанавливается базовая (программная часть – ПЧ) ИАСУ, программы-конверторы для обмена данными с другими АСУ («Бухгалтерия», «Склад» и т.д.), формируется сетевая структура с необходимым количеством пользователей, производится обучение персонала. Для управлений механизации, как правило, устанавливаются рабочие места для трех пользователей: главного инженера, начальников ПТО и службы материально-технического снабжения.

*На третьем этапе* производится разработка баз данных по запчастям,

материалам, режимам ТОР, технологическим местам[1] и интеграция их в программную оболочку. БД представляет собой информационное наполнение, которым оперирует ПЧ. Составление БД производится постадийно для обеспечения наискорейшего ввода ИАСУ в работу. Сначала вводятся режимы плановых операций ТОиР для возможности автоматизации их планирования. Практически все ИАСУ, применяемые в области эксплуатации строительных машин, ограничиваются выполнением только этой функции. Затем составляются электронные каталоги запчастей и материалов на основе бумажных, поставляемых производителем машин. На этой стадии ИАСУ способна присоединять к операциям ТОиР необходимые запчасти и планировать потребность в них. На последней стадии составления БД разрабатываются технологические места. В результате ИАСУ получает возможность функционировать почти в полном объеме. Трудоемкость составления БД составляет от ста до шестисот человеко-часов работы в зависимости от сложности техники и распределяется по этапам в примерном соотношении 1:4:3.

*На четвертом этапе* производится составление электронных форм документации для ввода данных, управления, учета и отчетности. Электронные формы повторяют в основном бумажные, принятые на предприятии. Также на этом этапе дорабатывается БД по выполнению неучтенных в третьем этапе операций ТЭ: проведению неплановых ремонтов, корректировке плановых ТОР, анализу качества выполнения операций, обработке эксплуатационной информации по наработке, отказам, техническому состоянию машин и т.п. БД дополняется документацией для ТОиР: инструкциями по выполнению отдельных видов работ, нормативными документами, штатным расписанием и т.д. В итоге БД должна содержать всю документацию по работе ПЭСМ.

*Пятый этап* можно назвать «опытная эксплуатация» ИАСУ. На этом этапе производится составление инструкций по работе с ИАСУ, производится окончательное обучение персонала.

**Расширение функций ИАСУ.** По своей структуре и назначению ИАСУ относится к типу информационных систем EAM (Enterprise Asset Management – системы комплексного управления основными фондами) и поэтому способна управлять не только технической эксплуатацией машин, но и всем предприятием (рис. 14). Для этого БД пополняется информацией обо всех основных фондах (зданиях, сооружениях, оборудовании, инструментах и т.д.).

Для расширения функций ИАСУ может быть дополнительно оснащена модулями «Система снабжения и сбыта», «Бюджет», «Персонал», «Диспетчерский журнал» и другими. Тогда ИАСУ сможет управлять всеми сторонами деятельности предприятия.

[1] Под термином «технологическое место» понимается комплекс средств и ресурсов для выполнения работ ТОиР: состав рабочих бригад, перечень и технология выполнения работ, трудоемкость по каждому исполнителю, документация, материалы, инструменты, оборудование, средства контроля и т.д.

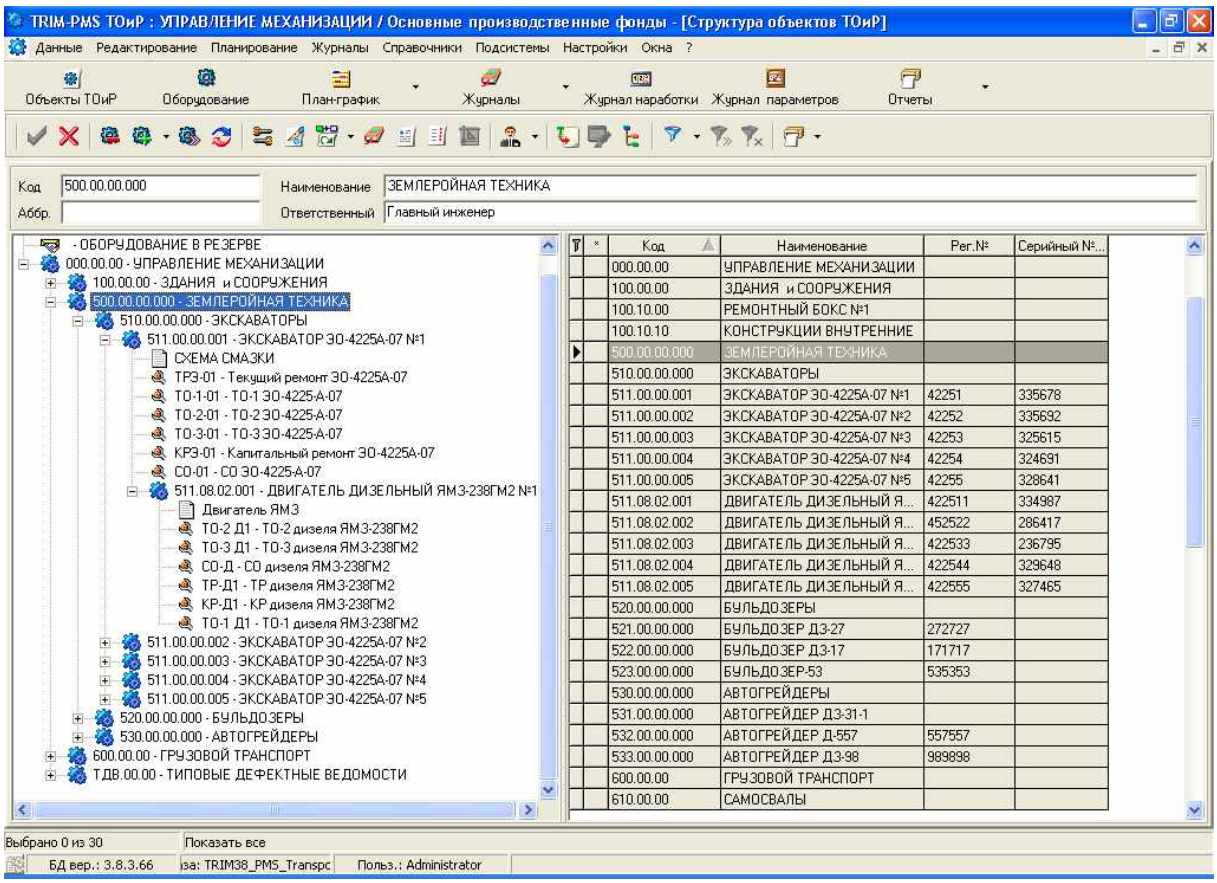



Рис. 14. Структура объектов ТЭ в ИАСУ

**Интегрированная логистическая поддержка жизненного цикла продукции.** В 2007 году разработано техзадание на создание ИАСУ интегрированной логистической поддержкой (ИЛП) жизненного цикла тракторов, выпускаемых ОАО «Кировский завод» (ЗАО «Агротехмаш», генеральная сбытовая компания ЗАО «Петербургский тракторный завод – дочернее предприятие ОАО «Кировский завод»). ЗАО «Агротехмаш» планирует создание сети дилерских и сервисных центров по реализации и обслуживанию своей продукции – промышленных тракторов. ИАСУ ИЛП объединяет несколько ИАСУ ТЭ поставляемой техники в фирменных сервисных центрах, обеспечивает централизованный сбор и обработку информации, снабжение запчастями и эксплуатационными материалами.

ЗАО «Агротехмаш» планирует осуществлять поставку тракторов, снабженных готовой ИАСУ ТЭ. Это позволит создать качественную систему ТОиР и в самостоятельных региональных центрах.

**Использование в учебном процессе.** На базе ИАСУ ТЭ создан учебный тренажер, на котором студенты выполняют практические задания по курсу «Эксплуатация строительных машин». Проводятся курсы лекций в Институте повышения квалификации при СПбГАСУ.

ИАСУ ТЭ представляет собой не только *программное обеспечение* или *базу данных*, а гибкий **инструмент для совершенствования** системы эксплуатации строительных машин, эффективный как для небольших предприятий, так и для крупных производственных объединений. Это не есть готовый, неизменный

продукт, а гибкая система, адаптируемая под конкретное предприятие для обеспечения наибольшей эффективности эксплуатации техники.

**Заключение**

Применение изложенной в настоящей публикации методологии позволит поднять на качественно новый уровень систему технической эксплуатации машин. Формирование новой СТЭ предусматривает реинжиниринг существующей на предприятии системы технической эксплуатации, переподготовку инженерных и руководящих кадров. Специалисты СПбГАСУ и НПП «СпецТек» проводят работу по анализу СТЭ предприятий, разработки рекомендаций по ее совершенствованию, формированию информационной сети предприятия, обучению и переподготовке персонала с выдачей удостоверений и дипломов государственного образца. Обучение можно проходить в Санкт-Петербурге и/или на месте нахождения предприятия. Координаты СПбГАСУ и НПП «СпецТек» можно увидеть в Интернете или узнать в редакции журнала. Отзывы на статью можно направить по адресу repinserge@mail.ru.

## Список литературы


1. Репин, С.В. Концепция эффективности эксплуатации строительных машин // Строительные и дорожные машины. – 2007: № 2 . – С. 27–31; № 4. – С. 21-25.
2. Репин С.В. Оптимизация показателей надежности строительных машин в эксплуатации // Строительные и дорожные машины. – 2006. – № 5. – С. 28-31.
3. Антоненко И.Н. Как автоматизировать управление техобслуживанием и ремонтом // Главный механик. – 2007. №5. – С. 34-43; №6. – С.36-46.
4. Рекомендации по организации технического обслуживания и ремонта строительных машин. МДС 12-8.2000 / Госстрой России, ЦНИИОМТП. – М.: ГУП ЦПП. –2000. – 76 с.
5. Волков Д.П., Николаев С.Н. Надежность строительных машин и оборудования. – М.: Высшая школа. –1979. – 400с.
6. Методические указания по разработке и внедрению системы управления качеством эксплуатации строительных машин [МДС 12-12.2002] – М.: Госстрой России. – 2003. – 28 с.
7. Сухарев Э.А. Теория эксплуатационной надежности машин. – Ровно: Издательство УГАВХ. – 2000. – 164 с.