

# Экономика, организация и менеджмент на предприятии

УДК 658.5

## Гибкое планирование работ по техническому обслуживанию специальной техники на основе формирования логистического состава изделия

**Д.А. Семушкин**

*Предложен метод расчета графика ремонтных работ для элементов логистического состава изделия при эксплуатации по регламенту и с учетом фактического остаточного ресурса. В основе такого графика лежит проведение анализа вида, последствий и критичности отказов (АВПКО). По результатам АВПКО выбирают элементы конструкции изделия, для которых необходима поддержка эксплуатации, и формируют логистический состав изделия.*

**Ключевые слова:** логистический состав, анализ видов, последствий и критичности отказов, график технического обслуживания.

## Flexible scheduling of special equipment maintenance based on formation of logistic products

**D.A. Semushkin**

*The method of the repair works schedule formation for the logistic structure elements is suggested. The process of FMECA - analysis of failures and their consequences makes the basis of the schedule. As a result of the process of FMECA, the design elements are chosen, which need the support in operation. These elements form the logistic structure of the technical system.*

**Keywords:** operation support, maintenance, logistic structure, analysis of failures and their consequences, schedule of repairs.



**СЕМУШКИН**  
Дмитрий Анатольевич  
аспирант кафедры  
«Промышленная  
логистика»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail:  
disemushkin@yandex.ru

Организация и управление предприятиями, поддерживающими функционирование технологического транспорта и специальной техники в последние годы, приобретает первостепенное значение — ведь главным фактором в конкурентной борьбе между производителями сложной техники становится не ее стоимость, а затраты владения, связанные с поддержанием надежности и работоспособности при эксплуатации. Именно в сфере эксплуатации наукоемкой продукции часто встречаются ситуации, когда производитель сложной техники увеличивает общие издержки за счет повышения затрат на разработку прогрессивных стратегий и программ технического обслуживания (ТО). Однако, если возрастут доходы от последующих продаж изделий, и разница между полученными доходами (результатами) и понесенными затратами будет больше, чем в предшествующем периоде, то такой вариант может быть более предпочтительным в перспективе. Безусловно, качество и объем послепродажного сервиса сложных технических систем дорого обходятся, но обеспечивают репутацию надежного и качественного поставщика продукции.

Таким образом, обоснование и выбор стратегий ТО становятся важнейшей частью систем поддержки жизненного цикла (ЖЦ) объектов техники, так как именно программы по ТО обуславливают появление агрегированных групп затрат, в том числе внеплановых, единственным способом снижения которых является переход к прогрессивным стратегиям эксплуатации и внедрение систем мониторинга и диагностики изделий [1].

В свою очередь, выбор стратегии и программы ТО обусловлен степенью критичности отказов основных элементов изделия — насколько критичны последствия отказа для сохранности объекта техники, инфраструктуры, персонала и окружающей среды. Поэтому одним из основных методов, применяемых для анализа надежности объектов техники, является анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО), в международной практике — FMESА. В этой области существует международный стандарт МЭК, во многих странах разработаны национальные стандарты, в России таковым является стандарт ГОСТ 27.301—95.

Суть процесса АВПКО заключается в качественном анализе объекта техники, включаю-

щим анализ основных назначенных функций (функциональный анализ), формализацию видов функциональных отказов и качественной оценке критичности последствий этих отказов, т. е. присвоении категории/группы критичности последствий отказа. Дополнение этих процессов формализацией управляющих воздействий в случае наступления данного вида функционального отказа позволяет в АВПКО также прописать и список работ по необходимому ТО. Данные, полученные в процессе АВПКО, можно представить в виде таблицы, что позволит формализовать качественный процесс и сделать его наглядным. Конечно, АВПКО сложного технического объекта может потребовать большого количества исполнителей, так как в первую очередь предусматривает анализ всей конструкторской документации.

Однако не всегда требуется анализировать конструкторскую схему изделия на всю глубину, кроме того, далеко не все предприятия-эксплуатанты, владеющие небольшим парком изделий, могут себе позволить это из экономических соображений, а для таких производств, как нефтегазодобыча, обслуживание угольных и рудоносных разрезов, расположенных на севере РФ и в Сибири РФ, это нецелесообразно и по кадровым причинам, и по климатическим (в сложных погодных условиях этих регионов меняют при ремонтном обслуживании не отдельные комплекты, а блок целиком).

В табличной форме представлен подход к укрупненному анализу конструкторской схемы, основанный на выделении основных, поддерживающих и вспомогательных блоков/активов. Под блоком/активом понимается агрегат, узел или комплект деталей внутри технической системы.

Результаты АВПКО лежат в основе создания логистического состава изделия (т. е. перечня элементов, требующих поддержки эксплуатации и технического обслуживания) и необходимы для оценки эффективности и контроля за плановой стоимостью ЖЦ по ключевым процессам: проектно-конструкторские работы, исключение и/или снижение тяжести возможных последствий внеплановых отказов, технологии опытного и серийного производства, эксплуатация, организация системы ТО и ремонта (ТОиР).

Исходная конструкторская информация о долговечности и надежности изделий должна

**Процедура АВПКО — анализ вида, последствий и критичности отказов. Формирование логистического состава изделия на основе выделения блоков конструкторской схемы, требующих поддержки эксплуатации**

Наименование блока (тип оборудования)	Вид актива	Вид функционального отказа	Категория критичности последствий отказа	Управляющие и компенсирующие воздействия в случае отказа	Определение списка работ ТО и восстановительных процессов	Формирование списка предметов МТС
Блок 1	Актив, выполняющий основную функцию. Останов актива приводит к существенным потерям мощности или снижает безопасность и надежность до критического уровня					
Блок <i>i</i>	Актив, поддерживающий основное производство, важный критичный компонент основной производственной единицы. Останов актива снижает выработку, снижает безопасность и надежность до потенциально опасного уровня или является причиной проведения дополнительных действий (переключений, изменений режимов работы, включения резервного оборудования) для предотвращения снижения эффективности эксплуатации					
Блок <i>n</i>	Не основной (вспомогательный) актив. Останов узла/ агрегата никак не отражается на основном производстве или снижении безопасности и надежности изделия					

дополняться отчетами о надежности из текущего производства и эксплуатирующих организаций с учетом условий интенсивности эксплуатации, эта информация является основополагающей для расчета регламента ТО и составления графиков проведения плановых ремонтов и также ремонта изделия по фактическому состоянию его технического ресурса [2].

В общем виде задача планирования ТО для объектов техники состоит из двух этапов и должна учитывать индивидуальный подход к определению остаточного ресурса как по активам, так и по конечному изделию в целом:

1) определение объемов работ по ТО и план-графиков их проведения при стратегии регламентированного ТО;

2) составление графиков ТО индивидуально по каждому изделию с учетом фактического остаточного ресурса с начала эксплуатации и после последнего технического воздействия для стратегии по фактическому состоянию.

Введем следующие обозначения:

$K$  — парк объектов техники определенной модели (модификации);

$k_j$  — номер объекта техники,  $j \in [1, \dots, m]$ ;

$\{T = T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_m\}$  — множество моментов проведения ТО объектам техники парка  $K$ ,  $j \in [1, 2, \dots, m]$  (обычно это множество задается периодом между ТО  $\Delta T$ , т. е.  $T_j = \Delta T_j$ );

$A_{ik}$  —  $i$ -й актив в  $k$ -м объекте техники,  $i \in [1, 2, \dots, n]$ .

Каждому активу  $A_{ik}$  можно поставить в соответствие вектор, характеризующий моменты отказов и трудоемкость работ по ТО:

$$\{r_{ik}, t_{ik}^1, \dots, t_{ik}^p\},$$

где  $r_{ik}$  — трудоемкость замены или ремонта актива  $A_{ik}$ , чел.-ч;  $\{t_{ik}^1, \dots, t_{ik}^p\}$  — последовательные моменты отказов актива, соответствующие конструкторской документации и усредненные по данному парку объектов техники  $K$  (для регламентированного ТО).

Набор значений  $\{t_{ik}^1, \dots, t_{ik}^p\}$  используется в качестве начальных данных для решения 1-го этапа, поэтому целесообразно задавать его некоторым подмножеством  $\{t_{ik}^j\}$ , так как остальная часть значений будет формироваться непосредственно в процессе решения задачи.

В указанных обозначениях первый этап задачи формулируется следующим образом: каждому  $T_j$  нужно поставить в соответствие набор номеров активов вместе с объемами работ по ремонту или замене, т. е.

$$\left\{ A_{ik}^1, \dots, A_{ik}^j, \dots, A_{ik}^m; \right. \\ \left. r_{ik}^1, \dots, r_{ik}^j, \dots, r_{ik}^m \right\}. \quad (1)$$

Критерием нахождения этого набора является условие минимизации суммы отклонений моментов времени проведения ТО от средних значений  $t_{ik}$ :

$$\sum_j \sum_{ik \in r_j} |T_j - t_{ik}| \rightarrow \min. \quad (2)$$

Внутренняя сумма рассчитывается по тем индексам  $i, k$ , для которых активы с номерами  $A_{ik}$  поставлены в соответствие  $T_j$ .

В качестве первого ограничения можно взять суммарный объем работ по ТО, который не должен превышать некоторого уровня (заявленного поставщиком):

$$\sum_{ik \in r_j} r_{ij} k_j \leq \text{const}. \quad (3)$$

Второе ограничение

$$t_{ik} \geq T_j, \quad (4)$$

т. е. минимум определяется на множестве тех усредненных моментов отказов активов  $t_{ik}$ , которые данному ограничению удовлетворяют.

С учетом того, что при регламентированном ТО для большинства активов величина  $t_{ik}$  значительно больше, чем период между работами по ТО, возможна следующая модификация задачи планирования ТО: установление соответствия (1) производится по принципу «до ближайшего  $T_j^r$ », т. е. восстановительно-ремонтные работы по замене актива приурочиваются к тому ТО, непосредственно после которого ожидается отказ. Актив  $A_{ik}$  принадлежит набору (1), если  $i$  и  $k$  таковы, что выполняется условие

$$\min |T_j - t_{ik}| \text{ при } t_{ik} \geq T_j. \quad (5)$$

В качестве исходных данных используется вектор  $\{r_{ik}^1, t_{ik}^1, r_{ik}^2, t_{ik}^2, r_{ik}^3, t_{ik}^3\}$ , остальные значения  $t_{ik}$  формируются в процессе решения.

В результате решения модели выдается список моментов проведения ТО  $T_j$  и наборы

$$\left\{ A_{ik}^1, \dots, A_{ik}^j, \dots, A_{ik}^m; \right. \\ \left. r_{ik}^1, \dots, r_{ik}^j, \dots, r_{ik}^m \right\}, \quad (6)$$

соответствующие отказам активов  $A_{ik}$  в моменты планируемого ТО  $T_j$ .

Перейдем ко второму этапу, представляющему наибольший практический интерес — составление графиков ТО индивидуально по каждому изделию с учетом фактического остаточного ресурса.

В процессе эксплуатации техники по фактическому состоянию средствами диагностики проводится регулярный мониторинг состояния объекта техники и его активов (агрегатов и узлов). Данные мониторинга используются для прогнозирования изменения контрольных показателей в целях гибкого построения расписания работ по ТОиР, а также для определения потребностей в материальных ресурсах, необходимых для проведения этих операций. Безусловно такой подход значительно уменьшает неизбежные ошибки и погрешности расчетных конструкторских данных по надежности и долговечности, так как здесь уже можно говорить не о горизонте прогнозирования момента отказа и, следовательно, моментов проведения работ по ТО, а интервале упреждения отказа/предотказного состояния, в разы, а то и в десятки раз меньшем по длительности. Это позволяет сформировать гибкое расписание ТО, сократить необоснованные экономические потери от принимаемых решений по ремонтам, заменам, прекращению эксплуатации, или наоборот, неоправданному продлению ресурса, ведущего к внезапному отказу [1].

Гибкое расписание производственно-восстановительных работ по ТОиР подразумевает:

- 1) адекватность фактическому состоянию технического ресурса и наступлению предотказного состояния;
- 2) тактическое планирование производственно-восстановительных работ и организации материально-технического снабжения, что позволяет значительно снизить затраты на все логистические процессы.

Таким образом, следующим шагом необходимо составить план ТО на ближайший период (например, неделя, месяц), т. е. указать на каждый день этого периода список объектов техники, подлежащих ТО с учетом фактического наработанного ресурса с начала эксплуатации, усредненной наработки на оставшийся интервал упреждения и после последнего технического воздействия.

При рассмотрении решения этой задачи воспользуемся следующими обозначениями:

$P_{ik}$  — назначенный эксплуатационный ресурс  $i$ -го актива  $k$ -го объекта, прописанный в техническом задании на поставку объекта техники;

$P_{ik}^n$  — наработанный эксплуатационный ресурс  $i$ -го актива  $k$ -го объекта техники с начала эксплуатации до момента последнего ТО;

$P_{ik}^1$  — наработка  $i$ -го актива  $k$ -го объекта техники после последнего ТО;

$P_{ik}^*$  — средняя будущая наработка  $i$ -го актива  $k$ -го объекта техники на интервале упреждения;

$\Delta T$  — периодичность ТО в единицах наработки;

$I_{ik}$  — прогнозная интенсивность эксплуатации  $i$ -го актива  $k$ -го объекта техники на интервале упреждения.

В этих обозначениях номер предыдущего ТО для актива  $A_{ik}$  определяется по формуле

$$A_{ik} = \left[ \frac{P_{ik}^n - P_{ik}^1}{\Delta T} \right]. \quad (7)$$

Квадратные скобки в формуле (7) обозначают, что заключенное в них выражение рассчитывается до ближайшего целого числа.

Дату периода (день/неделя/месяц), когда  $i$ -му активу  $k$ -го объекта техники нужно произвести ТО с номером  $A_{ik} + 1$ , можно определить из выражения

$$t_i = \left[ \frac{\Delta T - P_{ik}^1}{P_{ik}^*} \right]. \quad (8)$$

Среднюю будущую наработку  $i$ -го актива  $k$ -го объекта техники на интервале упреждения  $P_{ik}^*$  можно определить следующим образом:

$$P_{ik}^* = \frac{P_{ik} - P_{ik}^n}{I_{ik}}. \quad (9)$$

Интенсивность эксплуатации является случайной величиной, зависящей от многих факторов — климатических, сезонности использования, квалификации персонала, т. д., а для военных систем — и геополитической обстановки. При недостатке статистической и аналитической информации интенсивность эксплуатации можно прогнозировать с помощью экспертных методов, полагаясь на опыт и интуицию специалистов. Это позволит установить закон распределения, характеризующий этот показатель.

Для специальной техники, эксплуатируемой в сложных условиях Севера России, отрицательно влияющих не только на надежность объектов, но и на возможность проведения ремонтных работ (часто их проведение вообще невозможно без специальных защитных приспособлений по санитарно-гигиеническим нормам и наличия теплых цехов), переход к эксплуатации по фактическому состоянию имеет первостепенное значение.

### Выводы

Предложенный в статье подход к формированию графика-расписания восстановительных работ для специальной техники позволяет:

- учитывать различный износ и интенсивность эксплуатации активов (агрегатов/узлов) объектов техники, выполняющих основные назначенные функции, что соответствует прогрессивной стратегии эксплуатации по фактическому состоянию;
- рационально планировать ресурсы для восстановления работоспособности элементов логистического состава изделия, формируемого на основе анализа видов, последствий и критичности отказов.

Решение этих проблем в сложных условиях эксплуатации призвано в конечном итоге обеспечить минимизацию временных, материальных и финансовых затрат при организации ТО объектов специального назначения.

Представленная разработка может быть успешно внедрена в виде программного модуля информационно-управляющей системы поддержки эксплуатации различного рода сложных технических систем в режиме реального времени.

### Литература

1. Бром А.Е. Методология, методы и модели управления организационно-логистической системой поддержки жизненного цикла наукоемкой продукции / Под ред. А.А. Колобова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 240 с.
2. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
3. Кузнецов Е.С. Управление техническими системами. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2002. 202 с.
4. Яговкин А.И. Взаимодействие дерева целей и систем организации производства технического обслуживания и ремонта машин. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2003. С. 217–238. (Межвузовский сб. научн. тр.).

Статья поступила в редакцию 14.06.2012