

## Анализ и планирование технического обслуживания и ремонта сложного объекта на основе его функционального состояния

# 08, август 2011

авторы: Андриян К. Э., Курсин Д. А.

УДК 658.58

МГТУ им. Н.Э. Баумана

[ibm3@ibm.bmstu.ru](mailto:ibm3@ibm.bmstu.ru)

[dmitryak@mail.ru](mailto:dmitryak@mail.ru)

Рассматриваются конструктивно сложные и опасные для окружающей среды и обслуживающего персонала объекты и системы на их основе (ГЭС, ТЭЦ, АЭС, летательные аппараты). Аварии и отказы таких систем иногда носят катастрофический характер, поэтому проблемы обеспечения надежности сложных систем признаны задачами государственной важности [4].

С позиции теории надежности [1–3] и теории систем [5, 6] сложные системы имеют следующие свойства:

- уникальность и малосерийность, большая номенклатура конструктивных элементов;
- функциональная избыточность, простая система при отказе элемента теряет свою работоспособность, а сложная система даже при отказе целых подсистем не теряет работоспособность, зачастую только снижаются характеристики ее эффективности. Это свойство сложных систем обусловлено их функциональной избыточностью и затрудняет формулировку понятия «отказ системы»;
- большая длительность эксплуатации, данная характеристика сложных систем приводит к необходимости уделять внимание проблеме обеспечения долговечности;
- высокая надежность элементов, отказы сложных систем – события крайне редкие, объем статистической информации о работоспособности сложных систем в процессе эксплуатации невелик [1].

Развитие систем поддержки эксплуатации сложных изделий значительно отстает от эволюции самих изделий (и систем, состоящих из них) и основывается преимущественно на использовании принципов системы планово-предупредительных ремонтов (ППР).

Сущность системы ППР состоит в том, что после отработки изделием определенного времени производятся профилактические осмотры и(или) различные плановые ремонты, периодичность и продолжительность которых зависит условий эксплуатации изделия. Все

ремонтные работы выполняются в определенной последовательности, образуя повторяющиеся циклы. Основные виды работ системы ППР представлены на рис. 1 [2, 9].

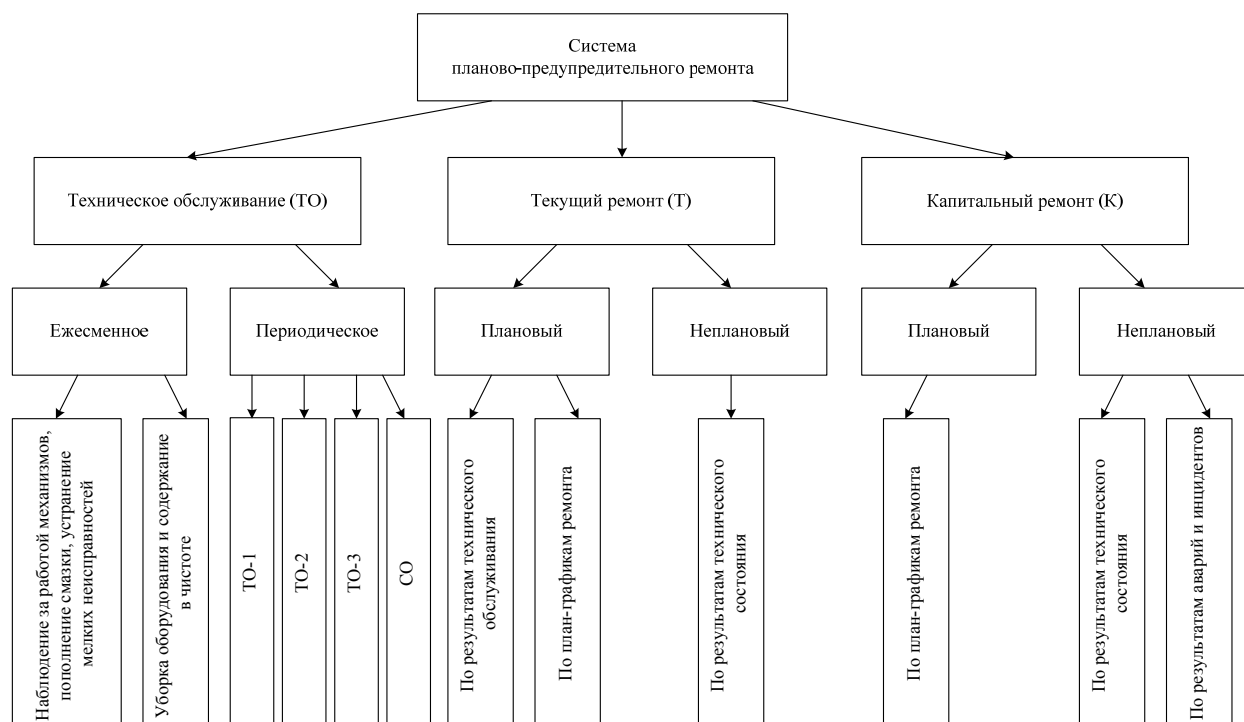


Рис. 1. Виды работ системы ППР: ТО-1,..., ТО-3 – периодическое ТО, 1,..., 3 – порядок периодов; СО – сезонное техническое обслуживание

Обычно для описания системы ППР используют следующие понятия: ремонтный цикл, структура ремонтного цикла, продолжительность ремонтного цикла.

Ремонтный цикл – это повторяющаяся совокупность различных видов планового ремонта, выполняемых в предусмотренной последовательности через установленные равные числа часов оперативного времени работы оборудования, называемые межремонтными периодами.

Ремонтный цикл завершается капитальным ремонтом (КР) и определяется структурой и продолжительностью. КР – наиболее сложный, существенный вид ремонта. Простои оборудования, связанные с выполнением плановых и неплановых ремонтов и ТО, в продолжительность ремонтного цикла не входят.

Структура ремонтного цикла – это перечень ремонтов, интервалов и описание работ (вид работ и их трудоемкость).

Например, структуру ремонтного цикла, состоящего из четырех текущих (ТР), одного среднего (СР) и одного КР, записывают следующим образом:

ТР – ТР – СР – ТР – ТР – КР.

Продолжительность ремонтного цикла – это число часов оперативного времени работы оборудования, на протяжении которого производятся все ремонты, входящие в состав цикла [3].

Если завод-изготовитель рекомендует в качестве системы поддержки изделия (оборудования, сложной системы) систему ППР, то он предоставляет в качестве сопроводительной документации карту планового ТО. Карта может разрабатываться как на каждую модель оборудования, так и на группу конструктивно близких моделей. Различия в условиях эксплуатации предлагается учитывать с помощью типовых коэффициентов. Пример эмпирических формул для определения продолжительности ремонтных циклов различных видов оборудования приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1 – Эмпирические формулы для определения продолжительности ремонтных циклов

| Вид оборудования                                             | Формула для определения длительности ремонтного цикла, $T_{pc}$ (часы, отработанные оборудованием) |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Металлорежущее оборудование                                  | $16800 \cdot K_{OM} \cdot K_{MI} \cdot K_{TC} \cdot K_{KC} \cdot K_B \cdot K_D$                    |
| Кузнечнопрессовое оборудование                               | $10000 \cdot K_{PO} \cdot K_B \cdot K_D$                                                           |
| Деревообрабатывающее оборудование                            | $11200 \cdot K_{PO} \cdot K_D$                                                                     |
| Литейное оборудование                                        | $6000 \cdot K_{PO} \cdot K_B$                                                                      |
| Электродвигатели, комплектующие технологическое оборудование | $12000 \cdot K_Y \cdot K_{PO}$                                                                     |

*Примечание.*  $K_{OM}$  – коэффициент обрабатываемого материала,  $K_{MI}$  – коэффициент материала применяемого инструмента,  $K_{TC}$  – коэффициент класса точности оборудования,  $K_{KC}$  – коэффициент категории массы,  $K_B$  – коэффициент возраста,  $K_D$  – коэффициент долговечности,  $K_{PO}$  – коэффициент ремонтных особенностей,  $K_Y$  – коэффициент условий эксплуатации

Использование системы ППР, несомненно, помогает поддерживать изделия в работоспособном состоянии на этапе эксплуатации, но она обладает рядом существенных недостатков:

- поскольку система ППР разрабатывается на основании среднестатистических показателей надежности и экономичности без учета возможных отклонений в эксплуатации, имеют место дополнительные затраты, вызванные как преждевременной заменой работоспособных деталей, так и(или) ремонтами по факту поломки (рис. 2);

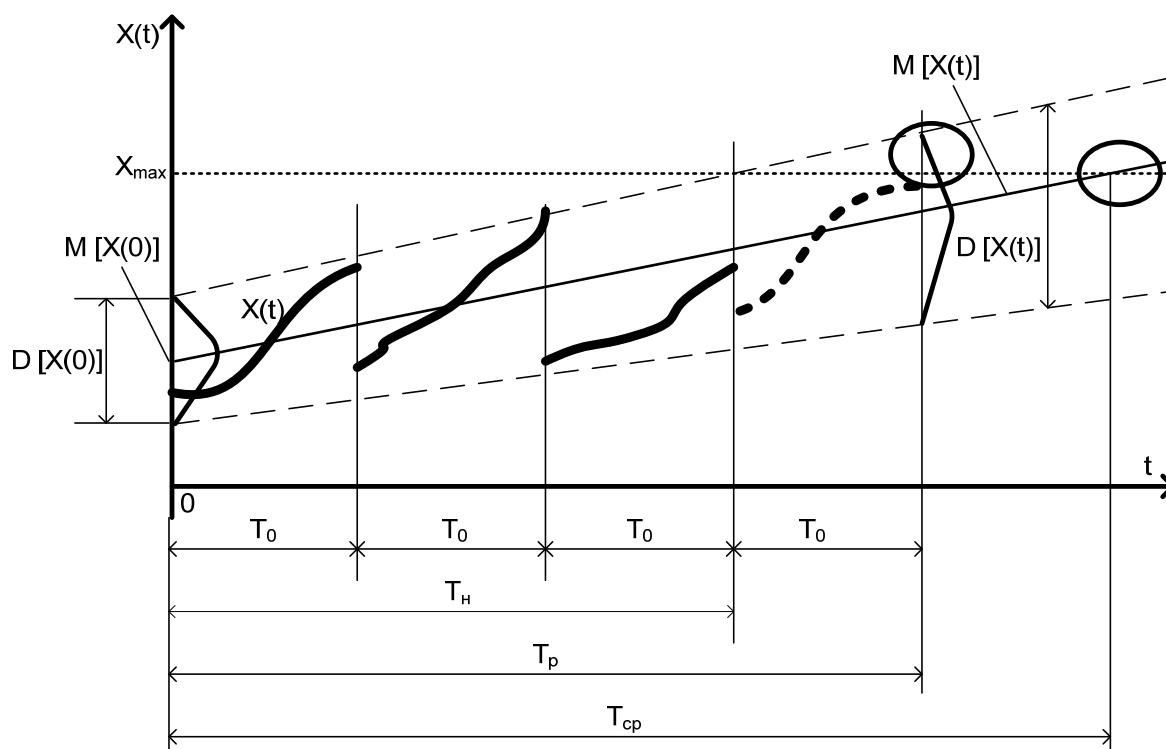


Рис. 2. Схема восстановления работоспособности изделия через заданные промежутки времени ( $T_0 = \text{const}$ ):  $X(t)$  – фактор (параметр), лимитирующий надежность;  $T_{\text{ср}}$  – средний ресурс изделия по данному параметру;  $T_n$  – запас надежности обеспечен;  $X_{\text{max}}$  – предельное значение параметра;  $T_p$  – ресурс с регламентированной вероятностью отказа;  $M[X(t)]$  – математическое ожидание параметра  $X(t)$ ;  $D[x(t)]$  – дисперсия параметра  $X(t)$

- для ряда объектов (электростанции, насосы трубопроводных систем, металлопрокатные станы и т.п.) плановая остановка работы является не приемлемой ввиду значительных экономических потерь, а последствия аварии носят катастрофический характер;

- в некоторых случаях использование статистики невозможно (если изделие новое или единичное), что характерно для изделий, которые имеют ограниченный срок службы в силу быстрого функционального и морального старения, – военной и специальной техники;

- плановый ремонт восстанавливает различные изделия до разного функционального состояния [4].

Таким образом, системным недостатком современных методов управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) является ориентация на массовость объектов, с целью применения статистического анализа, в то время как управление новыми поколениями технических систем не может использовать прежние статистические данные. Отсутствие доказанной диагностической информации ограничивает возможности по

управлению жизненным циклом (ЖЦ) и влиянию на стратегию эксплуатации. Принципы ППР сформированы в первой половине XX века для парка оборудования другой структуры: более простого, типового и массового [10].

Современные подходы к проблеме поддержки эксплуатации изделий основаны на развитии прикладных информационно-вычислительных систем. Для рационального управления сложными системами применяется отдельный класс информационных систем, называемых *Enterprise Asset Management (EAM)*.

Наиболее распространенным подходом к управлению объектами, реализуемым основной массой EAM-систем, является обычный эксплуатационный учет. Инструмент управления изделиями в таких системах – статистический анализ накопленной информации, а способ поддержания изделий в работоспособном состоянии – система ППР, разрабатываемая на основе имеющейся статистической информации [11, 12].

Появление и развитие высокоточных диагностических систем открывает новые возможности в управлении ЖЦ сложных изделий (объектов): недостатки системы ППР могут быть устранены введением интеллектуальных систем диагностики (СД) текущего состояния изделий (систем) и прогнозированием наилучшей стратегии эксплуатации [8] на основе актуальной информации о состоянии изделия с использованием вычислительных средств [7, 8].

Можно выделить следующие СД в зависимости от их оперативности и совершенства: диагностика с остановкой изделия, диагностика без остановки изделия (рис. 3).

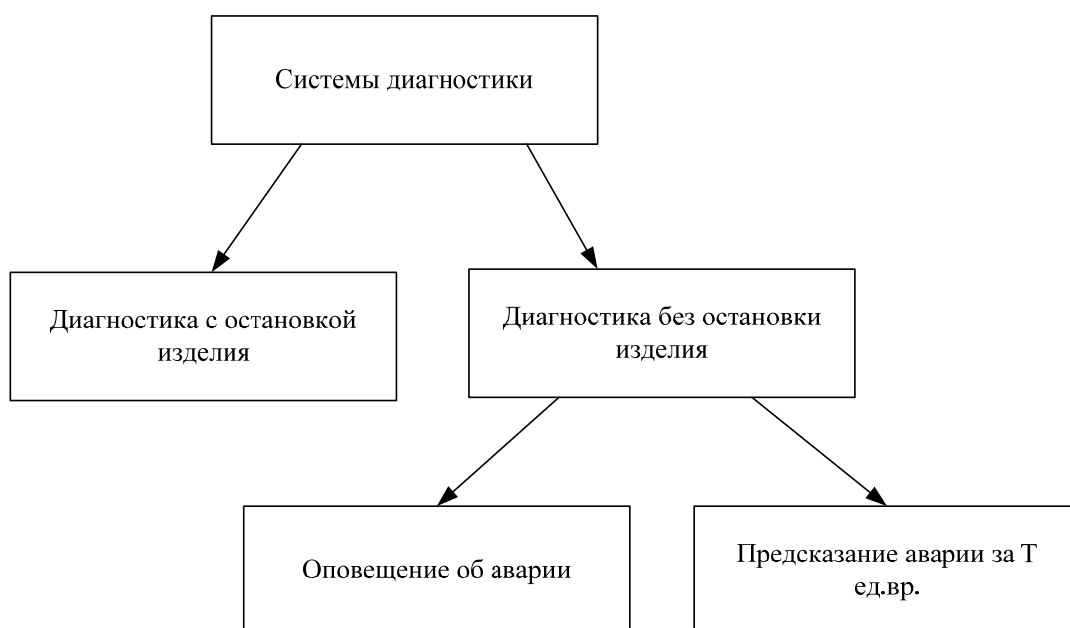


Рис. 3. Виды СД

Наиболее достоверная информация о состоянии изделия может быть получена на основе его исследования в процессе работы (без останова). Существует набор методов выявления состояния работающего изделия (агрегата): вибрационные, акустические, тепловизионные и др. Качество этих методов определяется в значительной степени возможностью учета в модели изделия его фактических параметров нагрузки и износа. Например, недостатком многих методов является регистрация вторичных явлений (вибрация, нагрев) при отсутствии возможности регистрации реального фактора износа и нагрузки. Тем не менее, результирующим показателем качества СД предлагается считать время прогноза состояния и его достоверность. Также СД различаются возможностью осуществлять периодический (дискретный) контроль и непрерывный контроль состояния работающего изделия.

Повседневной задачей многих промышленных предприятий является управление ЖЦ группы изделий при условии осуществления различных стратегий эксплуатации. При этом группа изделий обладает следующими свойствами:

- изделия имеют общую систему управления;
- общая целевая функция, выступающая как системообразующее свойство: совместное выполнение задания или объема работ;
- функциональная взаимозаменяемость;
- сходные потребляемые ресурсы (запасные части, ремонты, и др.).

Группу изделий, обладающую перечисленными свойствами, будем называть парком изделий.

Примерами парка изделий, имеющими наиболее сложно организованную эксплуатацию, являются ГЭС и ТЭЦ. Спрос на производственные мощности станций обоих видов носит сезонный характер. Кроме того на их работу влияют и природные особенности региона, в котором они расположены (для ГЭС – половодье и межень, для ТЭЦ – пик работы в отопительный сезон) (рис. 4).

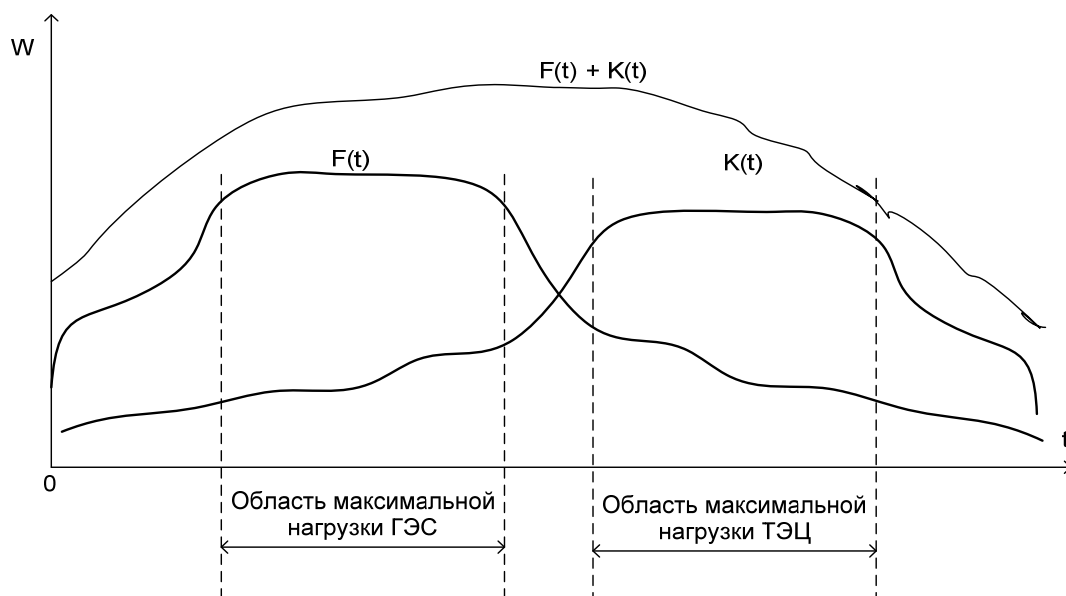


Рис. 4. Спрос на электроэнергию:  $W$  – потребляемая мощность;  $t$  – время;  $F(t)$  – функция изменения спроса на электроэнергию в зависимости от времени для ГЭС;  $K(t)$  – функция изменения спроса на электроэнергию в зависимости от времени для ТЭЦ

Анализ современных подходов показывает следующие способы проведения ТОиР:

- осуществление ТОиР методом ППР;
- осуществление ТОиР на основании данных СД, предупреждающей об аварии за небольшое время до ее свершения (интервал до момента аварии  $(t \rightarrow 0)$ );
- осуществление ТОиР на основании данных СД, предупреждающей об аварии за целевой интервал времени  $(t_{ц})$  – позволяющий управлять всем парком изделий.

Сравнительный анализ затрат при реализации различных способов ТОиР приведен в табл. 2 и проиллюстрирован на рис. 5.

Таблица 2 – Сравнительный анализ затрат при реализации различных способов ТОиР

| Показатель                    | Способ 1                                                                                                        | Способ 2                                                                                                                                                                                                                                                                | Способ 3                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Затраты на капитальный ремонт | Максимальны в случае, если ресурс изделия больше среднестатистического, поскольку возрастает вероятность аварий | Ниже, чем при способе 1 за счет оповещения об аварии                                                                                                                                                                                                                    | Ниже, чем при способах 1 и 2 за счет того, что есть возможность управлять моментом осуществления КР, аварии не допускаются и изделие эксплуатируется в соответствии с показателями его состояния               |
| Затраты на текущий ремонт     | Достаточно низкие за счет наличия четкого графика ремонтных работ                                               | Затраты высокие из-за отсутствия определенности, т.е. поиск привлечение ремонтных ресурсов осуществляется практически в момент поломки. Также следует учесть возможность возникновения потока отказов выше допустимого, что приведет к срыву производственной программы | При определенном интервале прогнозирования состояния изделия $t_{ц}$ – одного уровня с затратами при осуществлении ППР за счет возможности гибкого управления оборудованием и выбором удобного момента ремонта |
| Затраты на ликвидацию аварий  | Зависят от особенностей конкретного изделия. Могут достигать значительных размеров                              | Меньше, чем при способе 1 за счет предупреждения о большинстве аварий                                                                                                                                                                                                   | Минимальны по сравнению со способами 1 и 2 за счет наличия достоверной информации о текущем состоянии изделия. Вероятность аварий значительно меньше, чем при прочих вариантах                                 |

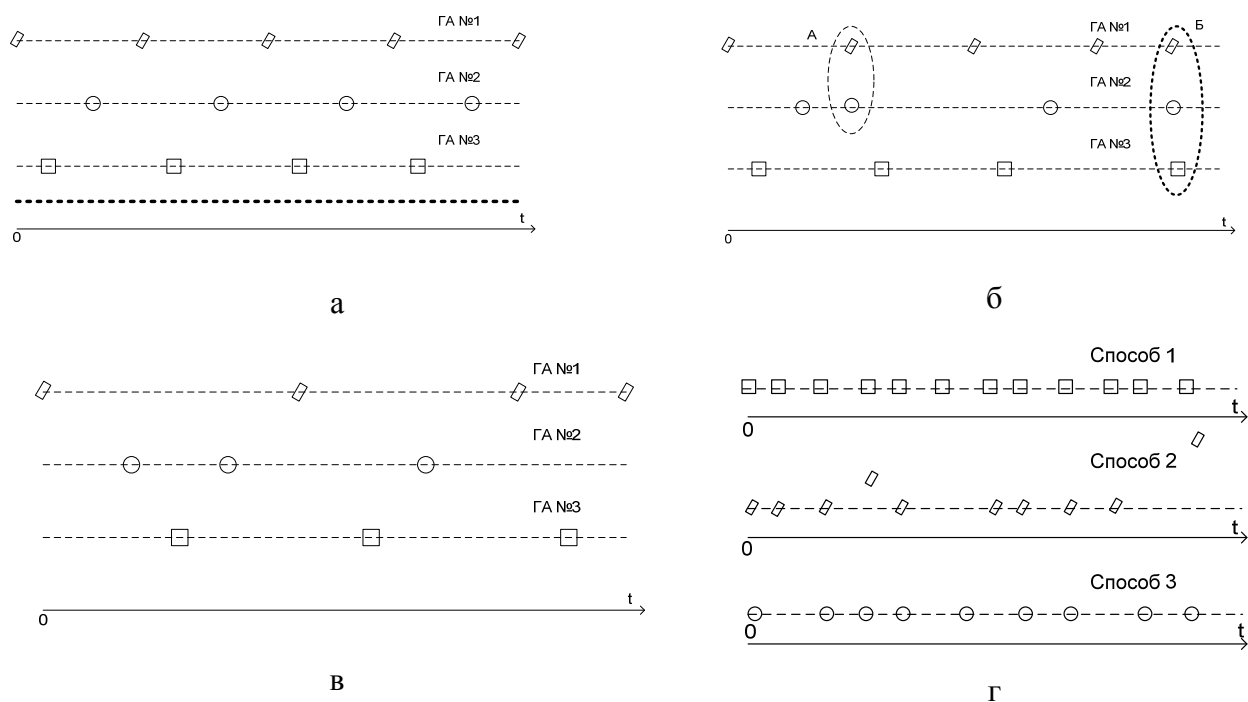


Рис. 5. График ремонтных работ трех гидроагрегатов при ППР (а); график ремонтных работ трех гидроагрегатов при выполнении ремонта вторым способом (б); график ремонтных работ трех гидроагрегатов при выполнении ремонта третьим способом (в); график периодичности и интенсивности ремонтных работ при реализации ремонта тремя способами (г): ГА №1,..., ГА №3 – гидроагрегаты номер 1,..., 3;  $t$  – время

Таким образом, использование СД, предупреждающих об отказе за  $t_{ц}$ , позволяет не только рационализировать систему ТОиР, но и гибко управлять парком изделий, ориентируясь на его внешние и внутренние ограничения.

Можно выделить следующие основные задачи управления ЖЦ изделий, решаемые с использованием СД:

- разработка модели управления парком изделий на основе информации о фактическом состоянии каждого изделия;
- разработка организационной системы управления парком изделий на основе информации о фактическом состоянии изделий;
- разработка метода оптимизации эксплуатации парка изделий на основе информации о фактическом состоянии изделий;
- технико-экономическое обоснование выбранной (разработанной) системы.

Модель применения СД предполагает подбор параметра – временного интервала ( $t_{ц}$ ), позволяющего управлять системой. На основании требуемого значения параметра времени подбирается СД, причем которая включает не только техническое решение (измерительный

прибор), но и информационную систему, помогающую принимать решения (распознавание состояния изделия в условиях ограниченной информации).

Организационная система применения СД должна включать не только функциональные подразделения предприятия-эксплуатанта, но также ремонтные организации, предприятие-изготовителя, поставщика материально-технического обеспечения, разработчика. Для оперативного принятия решения в рамках данной системы необходимо создание единого информационного пространства, постоянное взаимодействие всех элементов структуры для совершенствования всех этапов ЖЦ изделия.

При разработке любой системы управления ЖЦ следует определить приоритеты (показатели, которые необходимо оптимизировать) и ограничения, которые станут основой для разработки системы управления для конкретных изделий. Зависимость оптимизируемого показателя от некоторого набора переменных (варьируемых показателей), называют целевой функцией. В качестве целевой функции могут выступать экономические, технические, технико-экономические и прочие комплексные показатели.

Целевая функция может иметь следующий вид: минимум затрат на ЖЦ (как на отдельном этапе, так и интегрированной структуры); минимум простоев, поломок, аварий (технические показатели); максимум производительности (зависит от спроса), прибыли (выручки) (экономические показатели); максимум безопасность.

Ограничениями могут служить следующие величины: бюджет ТОиР; коэффициент готовности; производительность; аварийность (безопасность), убыток; оперативность СД.

Последнее ограничение обусловлено несовершенством СД.

Таким образом, для создания успешной системы управления ЖЦ парка изделий необходимо комплексное развитие, как систем диагностики, так и методов управления ЖЦ на основе достоверной информации о состоянии изделий.

#### Список литературы

1. *Яцура, А.И.* Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник [Текст] / А.И. Яцура. – М.: НЦ ЭНАС, 2006. – 492 с.
2. *Проников, А.С.* Параметрическая надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
3. *Острейковский, В.А.* Теория надежности [Текст] / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 464 с.
4. *Время не ждет* [Текст] / А.И. Байков, М.И. Киселев, А.А. Колобов и др. // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 9. – С. 27–33.

5. ГОСТ Р 27.001-2009. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.
6. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2007. – 20 с.
7. Курсин, Д.А. Разработка метода принятия решения при изменении проекта сложного машиностроительного изделия на основе результатов имитационного моделирования [Текст] / Д.А. Курсин // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 8. – С. 60–65.
8. Курсин, Д.А. Разработка модели управления жизненным циклом изделия на стадии эксплуатации [Текст] / Д.А. Курсин // Вестник машиностроения. – 2005. – № 9. – С. 53–58.
9. Типовая схема технического обслуживания и ремонта металло- и деревообрабатывающего оборудования [Текст] / под ред. В.Н. Клягин, Ф.С. Сабиров. – М.: Машиностроение, 1988. – 672 с.
10. Управление жизненным циклом продукции [Текст] / А.Ф. Колчин, М.В. Овсянников, А.Ф. Стрекалов, С.В. Сумароков. – М.: Анахарсис, 2002. – 304 с.
11. CALS. Поддержка жизненного цикла продукции: Руководство по применению [Текст]. – М.: ГУП «ВИМИ», 1999. – 44 с.
12. CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиастроении [Текст] / под ред. А.Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 670 с.