

С. В. Белодеденко /д. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина

М. С. Ибрагимов

ЧАО «Евраз-ДМЗ», г. Днепро, Украина

Выбор интервалов между инспекциями при предупредительном обслуживании металлургического оборудования

S. V. Belodedenko /Dr. Sci. (Tech.)/

National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro,
Ukraine

M. S. Ibragimov

PJS «EVRAZ-DMZ», Dnipro, Ukraine

Selection of intervals between inspections at preventive maintenance of metallurgical equipment

Цель. Анализ возможностей моделей предупредительного обслуживания для оптимизации его режимов, выявление резервов нормативной эксплуатационной стратегии для экономного расходования ремонтно-восстановительных затрат.

Методика. Методы оптимизации функций нескольких переменных.

Результаты. Показана ограниченность применения оптимизационных моделей математико-статистического типа для обслуживания объектов повышенного риска. При переходе к обслуживанию по техническому состоянию акцент в тратах средств на техническое обслуживание и ремонт смещается с ремонтных воздействий на диагностирование технического состояния, которое решает вопрос о следующих датах и объемах восстановительных мероприятий. Возрастает актуальность планирования операций контроля технического состояния.

Научная новизна. Сформулирован принцип построения вероятностно-стоимостных моделей расходов на техническое обслуживание и ремонт механического оборудования. Получены решения для оптимизационных моделей в относительных стоимостных и ресурсных показателях.

Практическая значимость. Приведен обзор оптимизационных моделей, очерчен круг стратегий обслуживания оборудования для эффективного использования экономико-статистических моделей. Даны алгоритмы поиска оптимальных межинспекционных интервалов, из которых следует, что за срок службы число инспекций составляет от 3 до 6. (Ил. 6, Библиопр.: 26 назв.)

Ключевые слова: техническое обслуживание, техническое состояние, риск, безопасность, контроль, мониторинг, отказ.

Актуальность проблемы и постановка задачи. Вопросы эксплуатации и ремонта механических систем технологического оборудования всегда были важны для промышленного сектора, но имеют особую актуальность для металлургического производства. Связано это с рядом обстоятельств. В себестоимости металлургической продукции преобладающую долю (существенно более 50 %) составляют затраты на сырье и энергию. Расходы на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) занимают тоже немалую долю (10–20 %). Учитывая, что доля прочих затрат не превышает эту величину (иногда в 3 раза меньше), то в прибавочной стоимости продукции металлургии доля затрат, связанная с содержанием оборудования, стабильно занимает более половины, иногда доходя до 70 % и выше [1].

Доля ремонтного персонала может достигать до 35 % всего списочного состава металлургического предприятия [1]. Даже в современных условиях аутсорсинга вспомогательных служб и оптимизации кадрового состава число ремонтников не опускается ниже 20–25 %, что видно на примере металлургического завода фирмы «Евраз» в Днестре. Подобная ситуация характерна и для зарубежного промышленного производства, что видно по индексам, характеризующим состояние ТОиР. Так, первый индекс в виде отношения затрат на ТОиР ко всем издержкам общепромышленного производства составляет 5 %, отдельно для химического производства этот индекс составляет 6,8 %, а для сталелитейного производства (читай – металлургии) уже 12,8 %. В металлургии затраты на ТОиР состав-

ляют 8,6 % от инвестиций в производство (против 3,8 % в химии) (третий индекс) [2; 3].

Принимая во внимание особую актуальность технологий ТОиР для металлургического производства, с целью оптимизации расходов по этой статье менеджмент предприятий стал постепенно отходить от традиционной планово-предупредительной системы ремонтов с их жестким графиком (превентивное обслуживание – РМ, рис. 1). На некоторых предприятиях стесненность в средствах на ТОиР привела к корректирующей стратегии обслуживания, когда восстанавливающие мероприятия производятся после фактов отказов (СМ, рис. 1). Как видно, в обеих стратегиях расходование средств C далеко не оптимально, и использование РМ и СМ-стратегий может быть оправданно только на отдельных этапах эксплуатации. Минимизации расходов на обслуживание оборудования и максимизации его готовности способствует стратегия обслуживания по техническому состоянию (technical condition maintenance – ТСМ, рис. 1). Данная стратегия предполагает использование гибкого графика ремонтов и характеризуется активным применением методов технической диагностики, вследствие чего в зарубежной литературе такие стратегии именуются как proactive (predictive) maintenance [2; 3], imperfect maintenance [4]. Кроме рассмотренных типов стратегии обслуживания по состоянию с контролем параметров, известен и широко применяется тип стратегии с контролем надежности (Reliability centered maintenance – RCM) [2]. Здесь уже возникает задача оценки последствий отказов, что привело к созданию стратегии с контролем риска и безопасности (концепция RBI – risk based inspection).

Учитывая сказанное, производители металлургического оборудования (например, SMS Meyer, SMS Siemag, Danieli, Eirich) стали оснащать его встроенными системами контроля функционирования, а самое примечательное, предлагают послепродажное сервисное обслуживание. По существу, это рекомендации по датам замен узлов, которые осуществляются (иногда в онлайн-режиме) по результатам мониторинга технического состояния. Такая тенденция актуальна, поскольку, принимая во внимание моду на аутсорсинг, от оборудования отторгаются постоянно наблюдающие его специалисты-механики, а количество информации, характеризующей техническое состояние, возрастает и усложняется.

При переходе к стратегии обслуживания по техническому состоянию акцент в тратах средств на ТОиР смещается с ремонтных операций на диагностирование технического со-

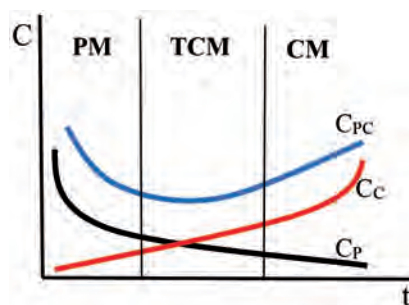


Рис. 1. Графики изменения общих ремонтных расходов C_{pc} , расходов на профилактические C_r и послеотказные C_c ремонты во времени эксплуатации t , а также соответствие их периодов стратегиям ТОиР (РМ – превентивное обслуживание, СМ – корректирующее обслуживание, ТСМ – обслуживание по техническому состоянию)

стояния, которое решает вопрос о следующих датах касательно объемов восстановительных мероприятий. Информация о работе оборудования, наравне с материальными ресурсами, становится реальным фактором производства, влияющим на его эффективность. В подобной ситуации возрастает актуальность не столько графика ремонтов оборудования, сколько графиков его осмотров, инспекций и контролей технического состояния.

Не менее важны вопросы периодичности процедур технического обслуживания и для традиционной в металлургии нормативно-предупредительной стратегии использования оборудования. От нее невозможно одномоментно перейти к выгодной ТМС-стратегии, хотя бы потому, что оборудование должно быть контролепригодным, а действующие машины и конструкции не отвечают этому. В подобных условиях оценка технического состояния и поиск дефектов производится посредством инспекций или ревизий, где предусматривается, как правило, разборка оборудования. Это существенно увеличивает трудоемкость обслуживания и время простоев производства. Поэтому оптимизация периодичности инспекций приобретает особую актуальность на пути перехода к обслуживанию по техническому состоянию.

Несмотря на очевидную актуальность вопросов периодичности контролей технического состояния металлургического оборудования, они совсем не находят отражения в современной отечественной учебной литературе по технической диагностике и эксплуатации машин [5–9].

Настоящая работа призвана, на основании обзора моделей и алгоритмов эксплуатационных процессов, помочь практикующим специалистам разобраться, какими критериями следует руководствоваться при назначении режимов технического обслуживания конкрет-

ного оборудования. Поэтому **целями** данной работы является как анализ возможностей моделей предупредительного обслуживания для оптимизации их режимов, так и выявление резервов нормативной эксплуатационной стратегии для экономного расходования ремонтно-восстановительных затрат.

Модели периодичности инспекций. Система ТОиР с планово-предупредительными ремонтами (РМ – preventive maintenance) относится к стратегии использования оборудования по нормативу и представляет последовательность запланированных периодически РМ-ремонтов, график которых нарушается случайно проводимыми послеотказными корректирующими ремонтами (СМ – corrective maintenance). Модель ТОиР для данной стратегии рассмотрена Диллоном [2; 3]. Она основана на марковских процессах перехода с интенсивностями λ , λ_r , μ , μ_r из работоспособного исправного состояния (G, рис. 2) в фазу РМ- или СМ-ремонта (и обратно).

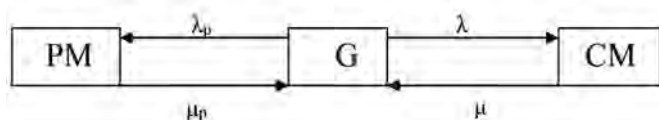


Рис. 2. Схема модели для превентивного обслуживания

Инспектирование при такой стратегии призвано снизить количество СМ-ремонтов, взяв на себя часть расходов на ТОиР.

Минимизация времени простоев. Общее время простоев может быть выражено следующим образом:

$$TDT = n_i \cdot T_i + \frac{m \cdot T_b}{n_i}, \quad (1)$$

где n_i – число инспекций в единицу времени (частота инспекций), T_i и T_b – время, потраченное, соответственно, на инспектирование и на восстановление после отказа; m – постоянная, связанная с особенностями технической системы.

Вполне очевидно, что общее время простоев TDT пропорционально частоте и времени инспекций (1, рис. 3). Не совсем ясно, на первый взгляд, за счет чего частота инспекций способствует уменьшению величины TDT (2, рис. 3). Это может объясняться вышеуказанным снижением числа отказов, что возможно, когда инспектирование (ревизия), наряду с контролем параметров технического состояния, сопровождается срочным ремонтом сменных элементов. Такая ситуация безусловна не для любой технической системы, в частности не всегда данная модель работает применительно к механическим системам в металлургии. Для них во время инспектирования следует производить замену

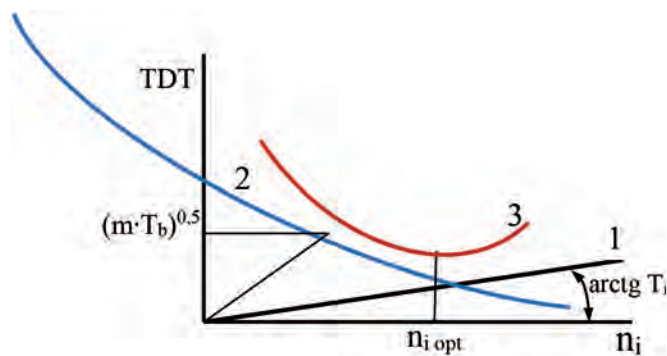


Рис. 3. Графическая интерпретация модели простоев (1)

смазки, регулировку узлов, подтягивание крепежа, то есть действия, «смягчающие» условия эксплуатации. В таком регламенте данная модель пригодна для механического оборудования промышленных производств.

Исследовав функцию $TDT(n_i)$ на минимум (3, рис. 3), получают оптимальное значение частоты инспекций [2]:

$$n_{i\text{opt}} = \sqrt{m \cdot T_b / T_i}. \quad (2)$$

Обозначив относительное время ремонтов как $T_r = T_b / T_i$ получаем оптимальный межинспекционный интервал:

$$\delta_{\text{opt}} = (m \cdot T_r)^{-0,5}. \quad (3)$$

Вторая модель простоев, предложенная в [2], представляет собой сумму удельного времени на ремонт DT_b и на инспектирование DT_i : $TDT = DT_b + DT_i$. Откуда:

$$TDT = \frac{\lambda}{\mu} + \frac{n_i}{\theta}, \quad (4)$$

где θ – интенсивность времени выхода из фазы инспектирования.

График данного уравнения подобен графику 3 (рис. 3). Приравняв нулю производную $\frac{d(TDT)}{dn_i} = 0$, получаем зависимость для определения оптимальной частоты инспекций:

$$\frac{d\lambda}{dn_i} = \frac{\mu}{\theta} = \frac{T_i}{T_b} = \frac{1}{T_r}. \quad (5)$$

Сравнительно простое решение данного уравнения можно получить для экспоненциального закона наработки на отказ, когда ее интенсивность представлена в виде [2]:

$$\lambda = \frac{1}{T_0} \exp(-n_i), \quad (6)$$

где T_0 – установленный срок службы при отсутствии ТОиР.

Здесь поддерживается основное положение первой модели о позитивном влиянии инспекций: с увеличением их частоты интенсивность

отказов падает, а наработка растет. Как и для первой модели, следует обратить внимание, что данное положение справедливо не для всех деградационных процессов, а лишь для тех, которые контролируются по прямому диагностическому признаку (износ, вибрация). Процесс накопления усталостных повреждений контролируется по косвенным признакам, поэтому в этом случае позитив от инспекций ослабевает.

Из уравнения (6) получаем:

$$n_{opt} = \ln\left(\frac{\theta}{\mu \cdot T_0}\right) \text{ или } \delta_{opt} = \left(\ln \frac{T_r}{T_0}\right)^{-1}. \quad (7)$$

Данная форма удобна, так как позволяет получить относительный интервал δ_{opt}^r , приняв $T_0 = 1$ (модель действительна при $T_r/T_0 > 1$). Использование безразмерной величины δ_{opt}^r оправданно, поскольку получаемый по моделям (7)–(11) межинспекционный интервал δ_{opt} зависит от единиц измерения T_0 .

Минимизация интенсивности затрат на ТОиР. Оценив общие (все) потери от простоев в единицу времени c_m , баланс интенсивности расходов можно представить как [2]:

$$c = c_m - \frac{c_m \cdot n_i}{\theta} - \frac{c_m \cdot \lambda}{\mu} - \frac{n_i \cdot c_i}{\theta} - \frac{c_{pc} \cdot \lambda}{\mu}, \quad (8)$$

где c_i и c_{pc} – удельные затраты на проведение одного акта, соответственно, инспекции и ремонта.

Величина, находящаяся в левой части данного уравнения, представляет собой неучтенную часть интенсивности потерь и фактически является характеристикой риска эксплуатации, связанной с упущенной выгодой и социальными последствиями [10].

Продифференцировав уравнение (8), обозначив относительную стоимость ремонтных затрат как $c_r = (c_m + c_{pc}) / (c_m + c_i)$ получаем оптимальный межинспекционный интервал:

$$\delta_{opt} = \frac{1}{\ln \frac{T_r \cdot c_r}{T_0}}. \quad (9)$$

Ясно, что интервалы, определенные по (7) и по (9), не совпадают. Учитывая, что $T_r > 1$, $c_r > 1$, то оптимальный межинспекционный интервал, определенный по модели минимума интенсивности затрат, будет меньше, чем величина δ_{opt}^r , определенная по модели минимума времени простоев. Однако подобное соотношение соблюдается не для всех моделей.

Связь межинспекционного интервала с заданным сроком службы T_0 найдена в работе [11] из условия постоянства интенсивности затрат на ТОиР c_1 для экспоненциального закона надежности:

$$\delta_{opt} = \left(2T_0 \frac{c_i}{c_1}\right)^{1/2}. \quad (10)$$

Учитывая, что доля расходов на инспектирование c_i незначительна в общих расходах c_1 , используя принятые обозначения, данная формула может быть преобразована к виду, удобному для сравнения:

$$\delta_{opt} = \left(\frac{2T_0}{c_r}\right)^{1/2}. \quad (11)$$

Из графиков зависимостей (9) и (11) для относительных периодов δ_{opt}^r можно считать, что расхождение между двумя моделями незначительное (рис. 4). Чем дороже ремонт, тем меньше стоимость инспекции, тем чаще можно ее проводить. При величинах $c_r > 20$ –30 оптимальная относительная величина межинспекционного периода перестает существенно зависеть от этого фактора. Для объектов, определяющих безопасность производства, у которых высокая относительная стоимость ремонта $c_r > 80$ –100

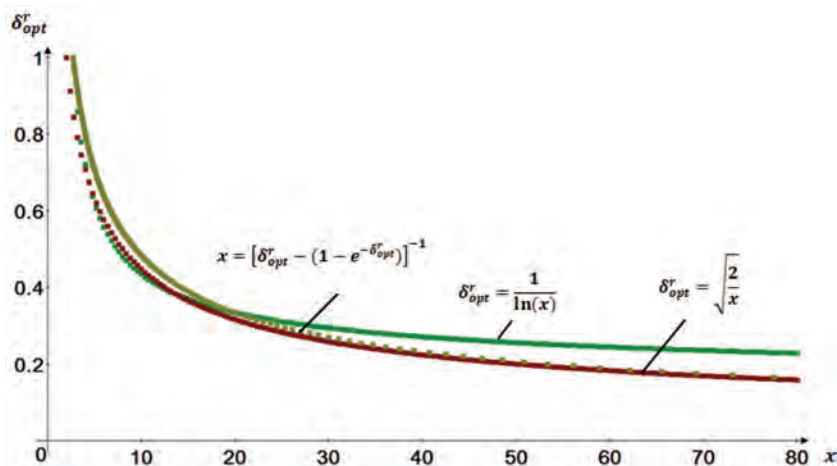


Рис. 4. Графики для оптимальных относительных межинспекционных интервалов δ_{opt}^r , полученные для модели (9) ($x = T_r \cdot c_r$), (11) ($x = c_r$), а также для модели (21) ($x = c_r$).

оптимальный относительный интервал составляет $\delta_{opt}^r = 0,15-0,20$. Таким образом, для механических систем промышленного производства, следуя данным моделям, можно рекомендовать 3–6 инспекций за весь срок службы. Подобный результат также получен для моделей, основанных на вероятностно-физических интерпретациях деградационного процесса [12].

В своей первой TDT-модели (1)–(4) Диллон не объясняет, как выбирать постоянную m . Из сравнения двух моделей можно предположить, что она имеет размерность частоты эксплуатационных событий и зависит от частоты инспекций n_i . Вследствие этого использование модели (1) проблематично для механических систем, у которых значительное время простоев от отказов, когда $T_b \gg T_i$.

Вероятностно-стоимостные модели для оптимизации режимов ТОиР. Во многих эксплуатационных практиках операции инспектирования, диагностического контроля, ревизии являются составляющей частью профилактик, при которых осуществляется восстановление системы. Периодические инспекции определяют объем предупредительных ремонтов. В такой ситуации периодичность ремонтов и инспекций совпадают и можно воспользоваться известными решениями для нахождения интервалов профилактических (превентивных) ремонтов.

Вероятностно-стоимостная модель в общем случае представляет сумму произведений вероятности $P_k(t_j)$ пребывания системы в фазе технического состояния в момент времени контроля t_j и «стоимости» пребывания системы в данной фазе C_k :

$$C(t) = \sum_k P_k(t_j) \cdot C_k \quad (12)$$

Изменяющаяся во времени вероятность $P_k(t_j)$ играет здесь роль весового коэффициента. Поскольку она связана со временем (фактически имея размерность вероятность/время), найденные по (12) расходы C получают смысл удельных расходов c , то есть расходов за время эксплуатации t_j . В статистическом аспекте обратной к функции $P_k(t_j)$ является функция распределения времени пребывания объекта в соответствующей фазе технического состояния. Так, для функции надежности обратной является функция распределения наработки на отказ $T(P)$ или функция распределения долговечностей T_p . Однако определять функцию расходов C через функцию $(T_p)^{-1}$, поставленную в формулу (12), вместо $P_k(t_j)$, принципиально возможно, только если эксплуатационная модель представлена не более чем двумя фазами технического состояния, образующими полную группу событий. Хотя результаты расчетов не будут одинаковы.

Если не интерпретировать техническое состояние различными его фазами, то для удельных затрат используется зависимость $c(t) = C_{\Sigma}/T_p$, где в числителе расположены общие расходы на восстановление [1]. Кроме ограниченности применения, среди неудобств следует отметить ее апостериорный характер и неясность наличия экстремума. Ведь не ясно, как будет возрастать число послеотказных ремонтов и затрат на них при увеличении срока эксплуатации. Данный подход пригоден для оценки оптимальности эксплуатационных стратегий, но не для оптимизации параметров режимов ТОиР.

В наиболее распространенном случае состояние технической системы описывается двумя фазами: превентивного ремонта, где удельные затраты c_p , и корректирующего ремонта, с удельными затратами c_c , в которых отражены и последствия отказов. По сравнению со схемой модели для превентивного обслуживания, представленной на рис. 2, в данном случае фазы G (исправное состояние) и PM (профилактика) объединены. Поэтому для них величиной $P_p(t_j)$ является вероятность безотказной работы системы $P(t)$, а вероятность пребывания в фазе корректирующего ремонта $P_c(t_j)$ соответствует вероятности отказа, то есть $P_c(t_j) = 1 - P(t)$. Тогда (12) будет выглядеть как:

$$C(t) = C_p(t) + C_c(t) = P(t) \cdot C_p + [1 - P(t)] \cdot C_c. \quad (13)$$

Если воспользоваться относительным изменением стоимостных затрат в виде $c_r = C_c/C_p > 1$, то данная формула трансформируется в:

$$C(t) = C_p [P(t) + [1 - P(t)]c_r]. \quad (13.1)$$

В таком случае плановые ремонтные расходы C_p играют роль масштаба, а график изменения расходов будет характеризоваться функцией $c_r(t)$, приобретающей признаки универсальности.

Чтобы получить нужную для оптимизации функцию интенсивности затрат, следует это выражение разделить на среднее значение наработки на отказ на интервале от 0 до максимального установленного времени эксплуатации T_0 , качестве которого для данной задачи выбирается межремонтный (межинспекционный) интервал δ [11; 13]:

$$c(t) = c_p(t) + c_c(t) = \frac{P(t) \cdot C_p + [1 - P(t)] \cdot C_c}{\int_0^{\delta} P(t) dt}. \quad (14)$$

Величина интеграла, стоящего в знаменателе этого выражения, оказывается несколько меньше верхнего предела δ , а для нормированного времени $\lambda t < 2$ его можно принимать равным δ .

Графики составляющих функции интенсивности затрат $c_p(t)$ и $c_c(t)$ симметричны горизонтальной линии, проходящей через точку $0.5c_p$ при равенстве $c_p = c_c$, то есть если относительные затраты, которые в данном случае удобно обозначать как $c_r = c_c / c_p$ равны единице (рис. 5). В такой ситуации функция затрат постоянна ($c_c = c_p = c = const$) и оптимизации не подлежит. В действительности для механических систем $c_p < c_c$, функции $c_p(t)$ и $c_c(t)$ убывают и возрастают с разной интенсивностью, а их суммарная функция будет иметь минимум в точке их пересечения, которая соответствует δ_{opt} . Чем больше величина c_r , тем меньше интервал δ_{opt} и тем круче восходящая ветвь графика $c(t)$. В принципе, при $c_p \ll c_c$ возможна ситуация, когда $\delta_{opt} \rightarrow 0$.

Если в интеграле (14) не ограничивать верхний предел, то через него можно найти средний ресурс T_0 , который реализуется для необслуживаемой системы:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (15)$$

Если система периодически обслуживается с интервалом δ , ее ресурс возрастает в соответствии с выражением [2]:

$$T_{0p} = \frac{\int_0^{\delta} P(t) dt}{1 - P(\delta)}. \quad (16)$$

В знаменателе этого выражения находится вероятность отказа системы к концу межинспекционного интервала. Чем она меньше, тем ресурс регулярно восстанавливаемой системы выше.

Чтобы ощутить эффективность приведенных моделей, рассмотрим систему из двух параллельно и одновременно работающих элементов, из которых одного достаточно для функционирования объекта. Интенсивность потока отказов составляет $\lambda = 0,1 \text{ лет}^{-1}$, а относительная сто-

имость непланового ремонта – $c_r = 20$. Функция надежности для системы такой конфигурации будет:

$$P(t) = 2 \exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t). \quad (17)$$

Аппроксимация интеграла в (14) дает среднюю наработку на отказ за эксплуатационный цикл (к концу интервала δ), которая выглядит как:

$$T_{\delta} = \frac{3}{2\lambda} - \frac{2}{\lambda} \exp(-\lambda\delta) + \frac{1}{2\lambda} \exp(-2\lambda\delta). \quad (18)$$

Тогда для необслуживаемых систем $T_0 = 3/(2\lambda)$.

Решения для минимума функции $c(t)$ при использовании функции надежности в виде закона Вейбулла-Гнеденко протабулированы для относительного интервала δ_{opt}^r . Они имеются в специальной литературе [11]. В общем виде минимум определяется графически построением функции $c(t)$. Полученный таким способом для рассматриваемого примера оптимальный интервал составляет $\delta_{opt} = 3 \text{ года}$ [13]. При этом вероятность безотказной работы будет $P_p = 0,929$, ресурс необслуживаемой системы составит $T_0 = 15 \text{ лет}$, а обслуживаемой с оптимальным интервалом – $T_{0p} = 43 \text{ года}$. Следовательно, относительный оптимальный интервал составляет $\delta_{opt}^r = 3/15 = 0,2$, что соответствует приведенным выше рекомендациям. Если увеличить δ до 8 лет, то интенсивность расходов возрастет в 1,24 раза, а обслуживаемый ресурс снизится до $T_{0p} = 23,4 \text{ года}$. Таким образом, оптимальная стратегия ТОиР дает не только сокращение расходов на них, но и способствует продлению срока эксплуатации системы, что еще более выгодно.

Модель «резервного времени». Данная модель инспектирования (backup model) предложена для стратегий ТОиР, где рассматриваются три фазы технического состояния, одна из которых (В-фаза) расположена между работоспособной (G-фаза) и неработоспособной (D-фаза) [14–17]. Фактически здесь предполагается функционирование технической системы в промежуточной фазе, модель для которой была предложена в 1960-х годах Барлоу [18]. Оценить принадлежность объекта к В-фазе или G-фазе возможно только путем контрольной проверки, поэтому при ТОиР активно используется техническое диагностирование. Следовательно, возрастает актуальность процедур контроля (checking), как растут и расходы на них C_i . Предполагается, что имеющийся дефект ведет к неисправности технической системы, но она может функционировать в такой фазе какое-то резервное время (букв. – обратное – backward time). Тогда в этой ситуации появляется возможность сэкономить на ремонтных затратах, имеющих интенсивность c_c (loss cost). Зная среднюю наработку на

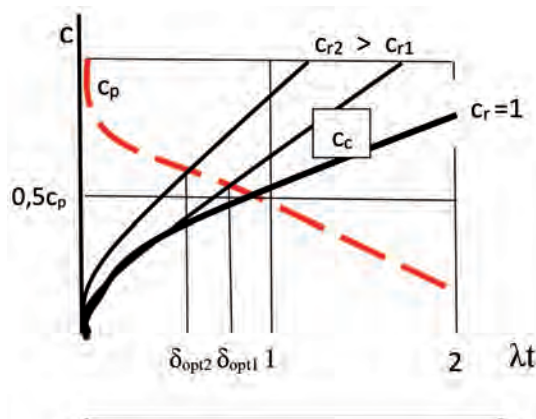


Рис. 5. Графики интенсивности расходов на профилактические (пунктир) и послеотказные (сплошные) восстановления для различных относительных стоимостей c_r

отказ T_0 , ремонтные издержки должны составить величину, равную $c_c \cdot T_0$. Баланс расходов $C(t)$ обусловлен постоянным линейным ростом планируемых ремонтных затрат совместно с затратами на контроль C_i и экономией этих затрат на временном отрезке $\delta = t_j - t_{j-1}$ между инспекциями j , которая сдерживается вероятностью отказа $F(j\delta)$ [14]:

$$C(t) = (C_i - c_c \cdot \delta) \sum_{j=1}^{\infty} F(j\delta) + c_c \cdot T_0. \quad (19)$$

Исходя из этих предпосылок предложены 3 варианта инспекционных режимов: периодический, с уменьшающимися межинспекционными интервалами (последовательный) и рандомизированный. Для первых двух режимов параметром инспекционной модели является отношение C_i / c_c , имеющее размерность времени. Для периодического режима оптимальный интервал δ будет постоянным и при экспоненциальном законе надежности определяется из уравнения:

$$\delta = T_0(1 - e^{-\delta/T_0}) - C_i / c_c. \quad (20)$$

Данное уравнение можно представить как:

$$\frac{\delta}{T_0} - (1 - e^{-\delta/T_0}) = \frac{C_i}{c_c \cdot T_0} = \frac{1}{T_0 \cdot c_r}, \quad (21)$$

из которого при $T_0=1$ можно найти оптимальный относительный интервал δ_{opt}^* . Графическая интерпретация данной модели свидетельствует, что ее использование дает результаты, близкие моделям (9), (11) (рис. 4).

Для последовательного режима межинспекционный интервал $\delta_j = t_j - t_{j-1}$ определяется из уравнения:

$$\frac{F(t_j) - F(t_{j-1})}{f(t_j)} = t_j - t_{j-1} - \frac{C_i}{c_c}, \quad (22)$$

где $F(t)$ и $f(t)$ – соответственно, вероятность и плотность вероятности распределения наработки на отказ.

Аналогичная модель, хотя и из других предпосылок, получена в работе [11]. Для первого межинспекционного интервала $t_{j-1} = 0$, а $\delta_1 = t_1$. Учитывая, что при экспоненциальном законе распределения времени наработки на отказ

$$f(t) = \frac{\exp(-t_j / T_0)}{T_0}, \text{ данная модель для } \delta_1 \text{ становится}$$

идентичной модели строго периодических инспекций (20). По результату использования приведенных алгоритмов следует, что дата первой инспекции составляет $\delta_1 = (0,2 - 0,4)T_0$, увеличиваясь с ростом ее стоимости C_i [14; 17].

Рандомизированный алгоритм инспектирования предназначен для многорежимных условий эксплуатации [16].

Возможности экономико-статистических оптимизационных моделей для ТОиР механических систем промышленных производств (заключение)

Экономико-статистические модели, где критериями оптимизации выступают максимизация функции готовности, а также минимизация простоев и удельных затрат на ТОиР, достаточно широко освещены в литературе по надежности [2-4; 13; 18-21]. Несмотря на это, они еще не находят подобоющего им применения в практике ТОиР технологического оборудования, оставляя место более комфортной, но более затратной системе планово-предупредительных ремонтов (ППР). В какой-то мере ее распространенность связана с организационными факторами: система ППР допускает проведение ремонтов одновременно для оборудования всего технологического комплекса, что важно для непрерывных процессов производства. При этом соблюдается жесткий график планирования. Использование оптимизационных моделей предполагает уход от этого принципа, а их результативность в рамках системы ППР выражается в снижении расходов на ТОиР на несколько десятков процентов. Более эффективно их использование при системе обслуживания по техническому состоянию. Однако необходимо создавать оборудование под подобное обслуживание, одним из требований которого является резервирование элементов технической системы. Благодаря этому ТОиР проводится для отдельных подсистем, исходя из решений оптимизационных моделей. Кроме этого, предполагается корректное использование рассматриваемых моделей, что имеет несколько аспектов.

1. Процедура инспектирования предполагает, что обнаруженный в процессе контроля дефектный элемент технической системы будет заменен при инспектировании. В такой постановке работают модели Диллона. Это актуально для незначительных, но сравнительно частых отказов. Вряд ли возможна подобная краткосрочная замена дорогостоящего элемента, отказ которого сопряжен с существенными последствиями (с высоким риском). А именно подобные дефекты разной степени опасности встречаются при диагностировании технологического оборудования.

2. Основная предпосылка, обуславливающая возможность процедуры оптимизации, связана с монотонным ростом со временем эксплуатации вероятности отказа и аналогичным снижением вероятности безотказной работы. Подобно этому ведут себя функции интенсивности последующих и профилактических восстановлений. Вследствие взаимовлияния конкурирующих процессов обслуживания функция интенсивно-

сти общих расходов $c(t)$ не является монотонной, имея минимум, соответствующий оптимальному интервалу восстановлений. С возрастанием относительной стоимости послеотказного восстановления, которая является параметром функции $c(t)$, оптимальный интервал восстановлений снижается. Это может привести к ситуации, когда отпадет целесообразность оптимизации.

Концепция инспекций, совмещающих обследование объекта и его превентивный ремонт, удачна, в первую очередь, для электронных технических систем, где регулярно выходят из строя мелкие элементы низкого риска эксплуатации, и ремонт их оперативен, не требует многих месяцев подготовки. Также такая концепция актуальна для технических систем, которые восстанавливаются путем регулировок, настроек. В такой ситуации бесспорна идея Диллона о продлении исходного ресурса за счет регулярных профилактик. Безусловно, поддержание требуемых параметров зубчатых зацеплений способствует длительной эксплуатации редуктора. Однако сложно представить, как регулярные осмотры (даже диагностирование) могут повлиять на накопление усталостных повреждений в силовых элементах конструкций.

Изложенные экономико-статистические модели применимы для тех механических систем, в которых преобладают отказы неотвечественных элементов, ведущих к неисправному состоянию. Такие элементы, как правило, не рассчитываются при проектировании, а выбираются конструктивно. К этой же категории относятся узлы, работоспособность которых сложно спрогнозировать расчетно. Это, например, элементы футеровок и охлаждающих систем, рабочие органы машин для переработки сыпучих материалов (дробилки, мельницы, смесители и т. п.). Основой моделей является функция надежности, которую обычно получают путем **изучения** объекта в процессе эксплуатации (апостериорно). Это сопряжено с временными затратами и дополнительными расходами материальных средств, которые не всегда учитываются в алгоритмах оптимизации.

3. Появление минимума на графике функции расходов на ТОиР во многом связано с ванноподобной формой функции интенсивности отказов $\lambda(t)$ [11], на которой наблюдаются 3 характерных участка: I – снижение интенсивности отказов (иногда называемый фазой «сгорания» – burn-in), II – установившаяся фаза, III – ускорение потока отказов (фаза катастрофического износа – wear-out) (рис. 6). Подобное поведение функции $\lambda(t)$ безусловно для электронных технических систем, а также для технических систем, у которых отказы обусловлены S-образной кинетикой повреждающих процессов. В част-

ности к таковым относятся процессы изнашивания. Кривая износа имеет начальный участок приработки, где скорость износа выше, чем на установившемся участке, но ниже, чем при катастрофическом износе. На этом основании ванноподобная форма кривой $\lambda(t)$ была распространена на механические технические системы, что дало возможность применять для них математико-статистические модели, полученные для электронных систем. Субъективными факторами наличия первоначального участка интенсивных отказов являются некачественная сборка машины (дефекты устраняются на стадии эксплуатации) и неподготовленность персонала (для оборудования нового типа возможны ошибки в правилах эксплуатации).

Специалисты, занимающиеся общей теорией надежности, обращали внимание на разницу в поведении эксплуатационных показателей электронных и механических систем. Для последних может иметь место экспоненциальная форма кривой $\lambda(t)$ (рис. 6) [13; 22; 23]. Она обусловлена тяжкими отказами, которые происходят вследствие повреждающих процессов с монотонной кинетикой (усталость, перегрузка). Кроме того, отличия объясняются индивидуальным характером свойств деталей каждой машины [24]. Подразумевается, что вариативность поведения элементов механических систем существенно выше и разнообразнее, чем элементов электронных систем. Поэтому математико-статистические методы надежности уступают место вероятностно-физическим уже на стадии проектирования не только уникального оборудования, но и серийно производимых мобильных машин [24; 25].

4. Оптимизационные алгоритмы основаны на теоремах теории восстановления о монотонном возрастании интенсивности послеаварийных ремонтов (СМ) и монотонном убывании интенсивности профилактических ремонтов (РМ) [11]. Наиболее удовлетворительно этому отвечают модели марковских переходных процессов, предусматривающие 2 фазы технического со-

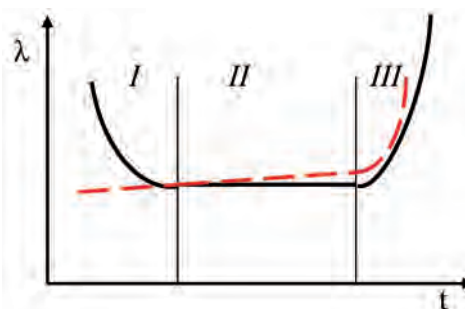


Рис. 6. Фазы интенсивности потока отказов для электронных (сплошная) и механических (пунктир) систем [23]

стояния (работоспособная – неработоспособная, исправная – неисправная), а также дискретность перехода из одной фазы в другую [12]. Это предполагает внезапность отказов. На самом деле практически все отказы имеют постепенный характер. Но главный недостаток такого подхода состоит в том, что, следуя ему, остаточный ресурс зависит лишь от последнего состояния объекта, и не зависит от истории эксплуатации, что также не вполне оправданно [26].

5. Один из путей снижения затрат на ТОиР связан с увеличением межремонтного периода (эксплуатационного цикла) за счет использования резерва в виде периода развития неисправности или дефекта до критического значения. Собственно, тенденция введения нескольких фаз технического состояния в эксплуатационные модели направлена на сокращение ремонтных издержек и повышение готовности оборудования. Такая идея воплощена в моделях, которые можно назвать моделями **отложенного ремонта**. К ним относятся модели резервного времени и модели задержки времени (не рассмотрены в данном обзоре). Модели, учитывающие промежуточные фазы технического состояния, потребовали развития методов их контроля. В результате этого актуализировались методы технического диагностирования.

Подводя итог сказанного, следует отметить, что большинство экономико-статистических моделей оптимизации сроков службы или инспекций имеют вероятностный характер. Они справедливы, если убытки от простоев сравнимы со стоимостью ремонтов, а затраты на инспектирование значительно меньше их. Допускается появление отказов, важно лишь, чтобы их частота была экономически оправдана. Вместе с этим в механических системах промышленных производств есть базовые и ответственные элементы, отказ которых нежелателен (недопустим), поскольку связан с последствиями, то есть эксплуатироваться с высоким риском. Использование таких элементов до нормативного срока службы экономически невыгодно, так как остается невыработанным, как правило, более половины технического ресурса. Целесообразно эксплуатировать их до предотказного состояния, контролируя его диагностические параметры. Если в рассмотренных моделях изменить в указанном аспекте стоимостно-вероятностные пропорции, то модели станут малопригодными (нечувствительными) для решения оптимизационной задачи. К тому же экономико-статистические модели оперируют с параметрами надежности **всей** системы (в целом), а необходимо получать информацию об остаточном ресурсе отдельных элементов, после чего объединять их в единый комплексный показатель.

Еще один мотив, ограничивающий действие экономико-статистических моделей, объясняется сложностью (иногда невозможностью) получения представительной выборки для установления типа и параметров закона распределения времени наработки на отказ. Все это подтверждает необходимость перехода к моделям ТОиР на основе вероятностно-физических подходов, учитывающих природу и параметры деградиационного процесса.

Библиографический список / References

1. Ченцов Н. А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы / Н. А. Ченцов. – Донецк: Неру-пресс, 2007. – 258 с.
2. Chentsov N. A. *Organizatsiya, upravlenie i avtomatizatsiya remontnoy sluzhby*. Donetsk, Neru-press, 2007, 258 p.
3. Dhillon B. S. Maintenance engineering: a modern approach. – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2002. – 222 p.
4. Dhillon B. S. Mining equipment reliability, maintainability and safety. – London: Springer, 2008. – 201 p.
5. Wang H., Pham H. Reliability and optimal maintenance. – Springer: Verlag London Ltd, 2006. – 352 p.
6. Кравченко В. М. Техническое диагностирование механического оборудования: учебник / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. Я. Седуш. – Донецк: ООО «Юго-Восток», 2009. – 459 с.
7. Kravchenko V. M., Sidorov V. A., Sedush V. Ya. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie mekhanicheskogo oborudovaniya*. Donetsk, Yugo-Vostok, 2009, 459 p.
8. Кравченко В. М. Визуальное диагностирование механического оборудования: учебное пособие / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров. – Донецк: ООО «Юго-Восток», 2004. – 120 с.
9. Kravchenko V. M., Sidorov V. A. *Vizual'noe diagnostirovanie mekhanicheskogo oborudovaniya*. Donetsk, Yugo-Vostok, 2004, 120 p.
10. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование / А. Я. Жук, Г. П. Малышев, Н. К. Желябина, О. М. Клевцов. – Запорожье: Издательство Запорожской государственной инженерной академии, 2008. – 500 с.
11. Zhuk A. Ya., Malyshev G. P., Zhelyabina N. K., Klevtsov O. M. *Tekhnicheskaya diagnostika. Kontrol' i prognozirovanie*. Zaporozh'e, Izdatel'stvo Zaporozhskoy gosudarstvennoy inzhenernoy akademii, 2008, 500 p.
12. Седуш В. Я. Надійність, ремонт і монтаж металургійних машин: підручник / В. Я. Седуш. – Донецьк: Юго-Восток, 2008. – 379 с.
13. Sedush V. Ya. *Nadiynist', remont i montazh metalurhiynykh mashyn*. Donetsk, Yugo-Vostok, 2008, 379 p.

9. Эксплуатация и обслуживание машин: учебник / В. М. Кравченко, А. А. Ищенко, В. А. Сидоров, В. В. Буцукин. – Донецк: Донбасс, 2014. – 533 с.
 - Kravchenko V. M., Ishchenko A. A., Sidorov V. A., Butsukin V. V. *Ekspluatatsiya i obsluzhivanie mashin*. Donetsk, Donbass, 2014, 533 p.
 10. Belodedenko S. V., Bilichenko G. N. *Quantitative risk-analysis methods and mechanical systems safety*. Metallurgical and mining industry, 2015, vol. 12, pp. 272-279.
 11. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
 - Baykhel't F., Franken P. *Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie*. Moscow, Radio i svyaz', 1988, 392 p.
 12. Смирнов Н. Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н. Н. Смирнов, А. А. Ицкович. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
 - Smirnov N. N., Itskovich A. A. *Obsluzhivanie i remont aviatsionnoy tekhniki po sostoyaniyu*. Moscow, Transport, 1987, 272 p.
 13. Smith D. J. Reliability, Maintainability and Risk: Practical methods for engineers. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. – 438 p.
 14. Nakagawa T., Mizutani S. A summary of maintenance policies for a finite interval // Reliability Engineering & System Safety. – 2009. – № 1, vol. 94. – Pp. 89-96.
 15. Taghipour S., Banjevic D. Optimal inspection of a complex system subject to periodic and opportunistic inspections and preventive replacements // European Journal of Operational Research. – August 2012. – Vol. 220, issue 3. – Pp. 649-660.
 16. Golmakani H. R., Moakedi H. Periodic inspection optimization model for a two-component repairable system with failure interaction // Computers & Industrial Engineering. – November 2012. – Vol. 63, issue 3. – Pp. 540-545.
 17. Chen M., Mizutani S., Nakagawa T. Optimal backward and backup policies in reliability theory // Journal of the Operations Research Society of Japan. – June 2010. – Vol. 53, no. 2. – Pp. 101-118.
 18. Barlow R. E. and Proschan F. Mathematical Theory of Reliability. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1965. – 256 p.
 19. Handbook of Maintenance Management and Engineering / M. Ben-Daya, S.O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic, D. Ait-Kadi-editors. – London: Springer, 2009. – 741 p.
 20. Engineering design handbook. Maintenance engineering techniques. – AMC Pamphlet. – 1975. – No. 706-132. – 553 p. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a021390.pdf>
 21. Maintenance Engineering Handbook / edited by R. K. Mobley, L. R. Higgins, D. F. Wikoff. – New York: McGrawHill Book Company, 2008. – 1244 p.
 22. Dhillon B. S., Singh C. Engineering reliability: new techniques and application. – New York: A Willey-Interscience Publ., 1981. – 318 p.
 23. Patev R. C. Introduction to engineering reliability. Available at: www.palisade.com/downloads/pdf/EngineeringReliabilityConcepts.pdf
 24. Альгин В. Б. Расчет реальной надежности машин. Подходы ресурсной механики / В. Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 1 (14). – С. 10– 20.
 - Al'gin V. B. *Raschet real'noy nadezhnosti mashin. Podkhody resursnoy mekhaniki*. Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. 2011, no. 1 (14), pp. 10-20.
 25. Machines and mechanisms design for reliability / A. Hahnel [et al.] // In 12th IFToMM World Congress, Besancon (France), June 18-21, 2007. – 7 p.
 26. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
 - Bolotin V. V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktsiy*. Moscow, Mashinostroenie, 1984, 312 p.
- Purpose.** Analysis of the capabilities of models of preventive maintenance to optimize its regimes, identify reserves of the regulatory operational strategy for the economical use of repair and recovery costs.
- Methodology.** Methods for optimizing functions of several variables.
- Findings.** The use of optimization models of the mathematical-statistical type for servicing high-risk objects is shown to be limited. When switching to maintenance, the accent in the costs of maintenance and repair is shifted from repair actions to diagnosis of technical condition, which solves the issue of the following dates and the volume of recovery measures. The urgency of scheduling of technical state control operations increases.
- Originality.** The principle of construction of probabilistic-cost models of expenses for maintenance and repair of mechanical equipment is formulated. Solutions for optimization models in relative cost and resource indicators are obtained.
- Practical value.** The review of optimization models is presented, the circle of strategy of service of the equipment for effective use of economic-statistical models is outlined. The algorithms for searching optimal inter-inspection intervals are given, from which it follows that for the service life the number of inspections is from 3 to 6.
- Key words.** Maintenance, technical condition, risk, safety, monitoring, monitoring, refusal.

Рекомендована к публикации
д. т. н. А. Д. Учителем
Поступила 13.02.2017