

## Автоматизированный комплекс подготовки информации для оптимизации процессов на постпроизводственных стадиях жизненного цикла изделий

В.П. Полетаев, Д.А. Богданов (Вологодский государственный университет)

*Предложены критерии оптимальности определения периодичности профилактических мероприятий, связанных с техническим обслуживанием. Разработана система информационной поддержки, позволяющая автоматизировать процесс интегрированной логистической поддержки жизненного цикла изделий.*

*Ключевые слова: надежность, техническое обслуживание, периодичность обслуживания, комплексные показатели, отказ, функция надежности, аппроксимация, метод наименьших квадратов, автоматизация.*

### Введение

В различных ответственных отраслях промышленности порой не уделяется должного внимания вопросам, связанным с обеспечением надежности оборудования, эффективности его технического обслуживания и ремонтов, от которых зависят изменение затрат на поддержание технических устройств в работоспособном состоянии, безопасность технологических процессов и персонала.

Затраты труда и средств на поддержание и восстановление работоспособности машин за весь срок службы могут во много раз превышать затраты на их изготовление. Большой экономический ущерб экономике наносит длительное нахождение изделий в неработоспособном состоянии в связи с их техническим обслуживанием, плановым и неплановым ремонтом. В последние годы наряду с экономическим аспектом этой проблемы все большее значение приобретает аспект социальный, так как в силу ряда демографических факторов резко сократился приток работоспособного населения. В результате сложившейся ситуации со всей остротой встала задача экономии и более рационального использования трудовых ресурсов, в частности, на ремонтных работах. Аналогичная ситуация наблюдается и за рубежом. В настоящее время техническое обслуживание приняло огромные масштабы и стало самостоятельной отраслью экономики, в которой заняты сотни тысяч и миллионы рабочих и инженерно-технических работников. Таким образом, проблема технического обслуживания и ремонта приобрела во всем мире чрезвычайно важное значение, а в пределах нашей страны ее можно рассматривать как проблему государственную. Уровень эффективности использования изделий по назначению, в том числе затраты на их техническое обслуживание и ремонт в значительной степени определяются выбранной стратегией обслуживания и ремонта, то есть системой правил, по которым осуществляется управление их техническим состоянием, принимается решение о моменте начала и объеме операций обслуживания и ремонта всех видов.

Современное промышленное производство, обеспечивая продукцией жизнедеятельность многих сфер государства и общества, одновременно является одним из источников техногенной опасности. К числу причин производственной аварийности оборудования, уровень которой по официальным данным

за последние десятилетия имеет тенденцию к росту, относятся недопустимый износ основных производственных фондов, неэффективные проектные и технические решения, несвоевременное выполнение работ по обслуживанию и ремонту. К числу приоритетных задач по повышению уровня безотказности оборудования относятся совершенствование методов анализа надежности, рациональное применение их результатов в действующем производстве.

Основная задача повышения качества эксплуатации оборудования состоит в обеспечении длительной и безотказной работы при минимальных затратах на техническое обслуживание и ремонт, которые необходимы для восстановления технических качеств, утраченных в процессе эксплуатации.

Вопросам создания автоматизированной системы технического обслуживания для своевременного предупреждения о предаварийном состоянии машины в условиях эксплуатации для исключения ситуаций, связанных с аварийным выходом из строя, а также для повышения сроков службы и эксплуатационной надежности техники, перехода от планово-предупредительного обслуживания машин к обслуживанию по фактическому состоянию, снижения времени простоя, сокращения затрат на их обслуживание и ремонт посвящено значительное число работ, например [1–3].

Для решения этих задач организуют системы технического обслуживания и проводят систематическую работу для оптимизации управления ТОиР. При этом главной проблемой является разработка математических моделей реальных процессов, протекающих при эксплуатации. Ниже рассмотрена стратегия обслуживания, имеющая место при наступлении скрытых отказов.

### Критерии оптимальной периодичности профилактических мероприятий

В процессе эксплуатации многих технических систем, приборов и оборудования имеют место скрытые отказы. Предложенная в статье модель справедлива, например, для средств измерения, при работе которых характерны так называемые параметрические (точностные) отказы, когда погрешность измерения внешне функционирующего прибора превышает допустимое значение. Как следствие, возникает необходимость проведения плановых аварийно-про-

Рис. 1. Окно выбора параметров

филактических работ (поверок) с целью выявления скрытого отказа. В связи с этим встает задача определения оптимальной периодичности профилактических мероприятий. Одним из критериев оптимальности может служить коэффициент технического использования  $K_{т.и.}$ , который определяется как отношение времени нахождения изделия в работоспособном состоянии  $T_p$  ко времени эксплуатации  $T$ . Можно показать, что при описанной выше ситуации для  $K_{т.и.}$  справедливо выражение:

$$K_{т.и.} = \frac{\int_0^{\tau} P_M(x) dx}{\tau + t_{nn} + (t_{an} - t_{nn}) F_M(\tau)}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — интервал между процедурами профилактического обслуживания;  $F(\tau)$  — значение функции распределения времени работы без отказа  $F(t)$  на момент времени  $\tau$ ;  $P(x)$  — значение вероятности работы без отказа (функция надежности) на момент времени  $x$ ;  $t_{nn}$  — среднее время, затраченное на проведение профилактической процедуры;  $t_{an}$  — средняя длительность

планово-аварийного обслуживания, включающего оценку состояния и последующее восстановление работоспособности.

При заданных значениях  $t_{nn}$  и  $t_{an}$  коэффициент технического использования является функцией от  $\tau$ . Для оптимальной периодичности обслуживания системы, соответствующей максимальному значению  $K_{т.и.}$ , производная от этой функции должна быть равна 0. Это необходимое условие экстремума. Как известно, существует еще достаточное условие, согласно которому в точке максимума вторая производная должна быть отрицательной. Исследование уравнения (1) на экстремум подтверждает его существование и свидетельствует о том, что данный экстремум будет максимумом.

Вторым показателем являются средние удельные затраты, приходящиеся на единицу времени работы, под которыми будем понимать отношение суммарных потерь, связанных с работой со скрытым отказом, проведением профилактического обслуживания и выполнением ремонта в случае обнаружения отказа, к продолжительности работоспособного состояния:

$$C_{уд} = \frac{c_n \int_0^{\tau} F_M(x) dx + c_{nn} t_{nn} + (c_{an} t_{an} - c_{nn} t_{nn}) F_M(\tau)}{\int_0^{\tau} P_M(x) dx}, \quad (2)$$

где  $c_n$  — потери за единицу времени, проведенного в состоянии скрытого отказа;  $c_{an}$  — потери за единицу времени при проведении восстановительных работ, выполняемых после обнаружения скрытого отказа;  $c_{nn}$  — потери за единицу времени при проведении периодического обслуживания;  $\tau$  — длительность интервала между обслуживаниями;  $F_M(\tau)$  — функция распределения времени работы без скрытых отказов;

$P_M(\tau) = 1 - F_M(\tau)$  — вероятность работы без скрытых отказов (функция надежности);  $t_{nn}$  — среднее время, затраченное на плановое обслуживание;  $t_{an}$  — средняя длительность обслуживания, включающего проверку состояния и последующее восстановление работоспособности.

Потери  $c_n$  в формуле (2) позволяют осуществить учет любых рисков, связанных с последствиями отказов. Так, например, применительно к средствам измерений они отражают появление ошибок контроля I и II рода и последствиями попадания годной продукции в брак и наоборот.

Очевидно, что частота проведения проверок работоспособности непосредственно сказывается на значении показателя (2), а оптимальный интервал между обслуживаниями будет соответствовать минимуму

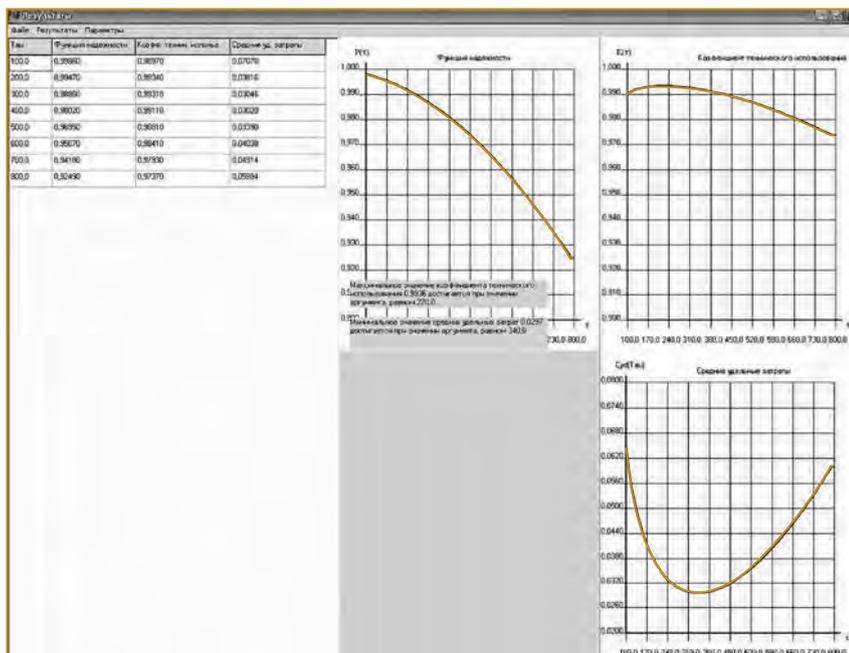


Рис. 2. Окно вывода результатов

средних удельных затрат. Следует отметить, что периодическое обслуживание не направлено на снижение вероятности отказов, а рассматриваемые модели отражают существующий уровень надежности.

Оценка закона распределения времени работы без отказов возможна на базе исходной статистической информации, полученной либо в результате испытаний, либо в процессе подконтрольной эксплуатации.

Для выполнения расчетов оптимальной периодичности профилактического обслуживания  $\tau_0$  используется разработанная для этой модели система информационного обеспечения, позволяющая автоматизировать определение параметров процесса интегрированной логистической поддержки жизненного цикла промышленного продукта. На рис. 1, 2 представлен пример работы системы определения оптимальной периодичности профилактических мероприятий.

При проведении расчетов часто используются зависимости вида  $y(x)$ , причем число точек этих зависимостей ограничено. Неизбежно возникает задача получения приемлемой представительности функций в промежутках между узловыми точками (интерполяция) и за их пределами (экстраполяция). Эта задача решается аппроксимацией исходной зависимости, то есть ее подменой какой-либо достаточно простой функцией.

В связи с этим было исследовано поведение функции надежности для нескольких типов распределения [4] всего диапазона оптимальных значений  $\tau_0$ . Графики показывают, что зависимость функции надежности от времени можно рассматривать как линейную, что подтверждается проверкой по критериям согласия Колмогорова и Пирсона:

$$P_m(\tau) = 1 - k\tau, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент, характеризующий поведение функции  $P_m(\tau)$ ,  $\tau$  — периодичность обслуживания;  $F(\tau)$  — функция распределения времени работы без скрытых отказов;  $P(\tau) = 1 - F(\tau)$  — вероятность работы без скрытых отказов (функция надежности).

Используя выражение (3), перепишем уравнение коэффициента технического использования и удельных затрат [4, 5]:

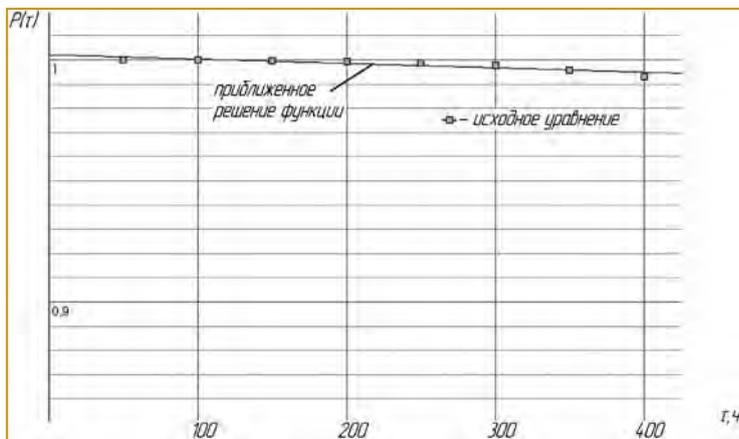


Рис. 3. Аппроксимация функции надежности

$$K_{mu} = \frac{\int_0^{\tau} (1-kx)dx}{\tau + t_{mn} + (t_{an} - t_{mn})k\tau} = \frac{\tau - k\frac{\tau^2}{2}}{\tau + t_{mn} + (t_{an} - t_{mn})k\tau},$$

$$C_{y\partial} = \frac{c_n \frac{k\tau^2}{2} + \alpha + \beta k\tau}{\tau - \frac{k\tau^2}{2}}$$

После несложных преобразований получим выражение, позволяющее в явном виде легко вычислить оптимальную периодичность профилактики скрытых отказов на основании максимума коэффициента технического использования и минимизирующее средние удельные затраты:

$$\tau_{01} = \frac{-t_{mn} + \sqrt{\frac{2t_{mn}}{k} + 2t_{an} \cdot t_{mn} - (t_{mn})^2}}{1 + k(t_{an} - t_{mn})},$$

$$\tau_0 \approx \sqrt{\frac{2c_n t_{mn}}{c_n k} - \frac{c_n t_{mn}}{c_n}}, \quad (4)$$

где  $t_{mn}$  — среднее время, затраченное на проверку состояния объекта;  $t_{an}$  — средняя длительность планово-аварийного обслуживания, включающего проверку состояния и последующее восстановление работоспособности.

#### Алгоритмическое обеспечение метода оценки состояния оборудования

Алгоритмическое обеспечение, разработанное применительно к конкретному объекту, позволяет определить необходимую структуру и состав вычислительно-управляющего комплекса. Алгоритмическое обеспечение представляет собой совокупность *математических методов, моделей и алгоритмов обработки информации с их взаимными связями для решения задач и обработки информации.*

Собранные статистические данные об отказах обрабатываются ПО: осуществляется выбор вида распределения и его параметров, с помощью метода наименьших квадратов происходит аппроксимация экспериментальных данных, определяется коэффициент определения функции надежности, на основании предложенных моделей определяется оптимальное время технического обслуживания [6,7].

Далее, с целью сокращения внеплановых ремонтных работ и простоев оборудования производится оптимизация программы технического обслуживания и ремонтов — устанавливается срочность ремонта, его продолжительность, трудозатраты, требования в запасных частях и материалах, ответственные. Составляются соответствующие данной процедуре документы в электронном виде: ведомости, заявки, сметы, графики, акты, от-

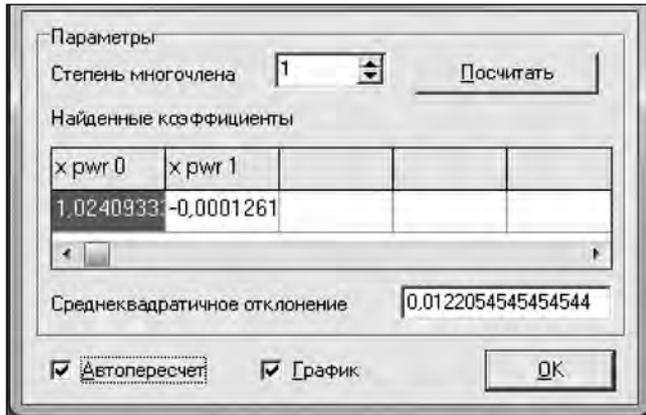


Рис. 4. Аппроксимация многочленом

четы. На следующем этапе возможно проведение экспериментальной проверки данных методов и алгоритмов, а также реализация данных схем с помощью автоматизированного комплекса принятия решений по техническому состоянию оборудования.

Полученный алгоритм может быть программно и аппаратно реализован в автоматизированных системах управления техническим обслуживанием и ремонтами, тем самым позволяя в реальном режиме времени оценивать техническое состояние машиностроительного оборудования, а также реализовать стратегию оптимизации ремонтных работ по техническому состоянию оборудования, его износу.

Алгоритм принятия решения об эксплуатации оборудования на основе линейной аппроксимации реализован с помощью программы MathCad. Программа позволяет получить аппроксимацию произвольного числа точек вида  $(x, y)$  многочленом, а также имеет возможность отображения данных в различных форматах [8].

Ввод данных (экспериментальных точек) производится вводом чисел во внутреннем формате ОС Windows в ячейки таблицы  $X=$ ,  $Y=$ . Ячейки с неверными данными игнорируются при расчетах, о чем дается предупреждение.

Для нахождения функции аппроксимации предназначен пункт меню «Аппроксимировать/Многочленом». В открывшемся окне выбирается степень многочлена. В поле «Среднеквадратичное отклонение» отображается среднеквадратичное отклонение точек от полученной функции. Автопересчет при включении опции «Пересчет многочлена» происходит при каждом обновлении графика (рис. 3). График при включении опции «График аппроксимирующей функции» отображается в графическом поле в виде кривой. Найденный коэффициент (рис. 4) позволяет решить уравнение (2), значительно сократив время расчета.

Дальнейшие расчеты реализованы в программе MathCad и позволяют найти решения упрощенных уравнений.

*Математика прекрасна сама по себе, но, когда она несет эту красоту в развитие цивилизации, это становится поиском совершенства.*

А. В. Волошинов

#### Заключение

Таким образом, автоматизированные средства оценки состояния оборудования могут быть использованы в качестве основы для разработки и внедрения автоматизированной системы планирования, обслуживания и проведения предупредительных ремонтных работ, интегрированной с существующими АСУ КП. В основе предлагаемой стратегии ремонтных работ по техническому состоянию оборудования предложен регламент выполнения ТОиР (периодичность и объемы) на основании данных по эксплуатации и отказам оборудования.

#### Список литературы

1. Bolnokin, V.E., Ivashov, E.N., Kostomarov, P.S., Yagovtsev, V.O. Maintenance strategy for engineering systems // Russian Engineering Research. 2015. №10 (35). p. 721-723.
2. Специалисты об автоматизации — взгляд изнутри // Control Engineering Россия. № 5 (65). 2015. С. 20-24.
3. Pavlov, P.P., Litvinenko, R.S., Mubarakhin, M.N., Yushin, I.O., Nigmatullin, V.M. A technique for selecting a rational variant of a multifunctional aircraft system // Russian Aeronautics. 2008. № 2 (51). P. 198-204.
4. Полетаев В.П., Богданов Д.А. Оптимизация периодичности профилактики отказов // Тр. междунар. симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 1. С. 35 - 37.
5. Полетаев В.П., Микрюкова О.И., Богданов Д.А. Управление профилактическим обслуживанием при различном проявлении отказов технических систем // Тр. междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта». ИПУ РАН. 2011. С. 249-250.
6. Полетаев В.П., Микрюкова О.И., Богданов Д.А. Определение целевых функций критериев периодичности технического обслуживания // Тр. междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта». ИПУ РАН. 2012. С. 292-294.
7. Полетаев В.П., Богданов Д.А. Автоматизированная система оптимизации периодичности профилактики проявления отказов // Тр. междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта». ИПУ РАН. 2015. С. 224-226.
8. Полетаев В.П., Богданов Д.А. Автоматизированная система реализации модели оценки технического состояния оборудования на основе линейной аппроксимации // Тр. междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта». ИПУ РАН. 2016. С. 364-366.

*Полетаев Владимир Павлович — канд. техн. наук, первый проректор, доцент,  
Богданов Дмитрий Александрович — старший преподаватель кафедры теории и проектирования машин  
и механизмов, Вологодского государственного университета.  
Контактный телефон 72-50-54 (3-03).*