

## **ИНФОРМАЦИОННОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 539.4

С.В. Белодеденко

### **РЕСУРСНАЯ МЕХАНИКА – НАПРАВЛЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МАШИН И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Современное проектирование механических систем осуществляется машинным способом. Широко используются три-четыре системы автоматизированного проектирования (САД), имеющие принципиальные различия. Для расчетов механизмов и их деталей в арсенале конструктора есть широкий круг средств компьютерного моделирования. Это относится в первую очередь к созданию образцов деталей, которые могут быть собраны в механизмы, а они – приведены в движение. Появляется возможность подробно исследовать кинематику механизма, получить статические и динамические нагрузки. В результате подбирается конфигурация механизма, максимально отвечающая задаваемому закону движения рабочего органа и минимизирующая паразитные нагрузки.

Для технологического оборудования традиционно сложившаяся структура расчетов предполагает первоочередное обоснование функционирования механической системы, после чего выполняются расчеты, обеспечивающие ее надежность. Причем в этой области преобладают расчеты проверочного характера. В качестве проектировочных выступают расчеты в статической постановке по запасам прочности. От этого оборудование выходит тяжелым и габаритным. Автоматизация проектирования позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние, практически, каждой нестандартной детали, а увеличение количества обоснованных таким путем элементов в конструкции снижает ее материалоемкость. Это объясняется уточнением действующих расчетных напряжений, которое дает уменьшение массы единицы конструкции на 8-10% [1]. Если учесть, что при «ручных» проектах рассчитывается не более

трети деталей, то только машинное проектирование без изменения его концепции позволяет на 6-8% снизить массу машины.

Сложившаяся структура расчетов плохо восприимчива к возможностям современного инженерного инструментария из числа информационных технологий. Для создания качественных машин следует сместить акцент от проверочных расчетов к оптимизационно-поисковым. Целью данной работы является построение методологии проектирования и использования механических систем технологического оборудования, минимизирующей расходы на их создание и эксплуатацию при требуемом уровне надежности и безопасности. Такие задачи могут решаться методами ресурсной механики – направления машиноведения, изучающего влияние повреждающих процессов на долговечность.

### Сущность ресурсной механики

Долгие годы обеспечение надежности технологических машин при проектировании было опосредствовано через оценку напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и обоснование их запасов прочности  $n\sigma$ . Регламентировано минимальное значение этой величины – несколько большее единицы. По максимуму величина  $n\sigma$  не ограничена. Фактически она устанавливается из конструктивной целесообразности, чтобы соблюсти требуемые параметры механизмов. Невзирая на произвольно сформированные таким подходом многократные запасы прочности, оборудование не застраховано от внезапных разрушений.

Привлечение в инженерную практику вероятностных методов расширило трактовку запасов прочности. Понимание того, что при  $n\sigma=1$  разрушение произойдет в 50% случаев, снизило степень консерватизма при проектировании, но, естественно, не повысило безопасность. Вероятностная трактовка запаса прочности, несмотря на ее результативность по сравнению с детерминированной оценкой, не дает возможности судить об ожидаемом числе разрушений [2], и значит, не дает возможности нормировать величину  $n\sigma$ .

В этом аспекте более продуктивен такой показатель, как вероятность безотказной работы (ВБР) или безопасность  $R$ . Обычно они трактуются, как вероятность того, что несущая способность (прочность) конструкции  $\sigma$  превышает действующую на нее нагрузку

$S$ , то есть – вероятность события  $\sigma - S > 0$ . Подобная интерпретация безусловно справедлива для отказов внезапного типа, но распространение ее на постепенные отказы (усталость, износ) некорректно, поскольку здесь векторы  $\sigma$  и  $S$  перестают быть независимыми.

Этих недостатков лишен ресурсный подход, при котором ВБР устанавливается при сравнении пары наработка  $n_L$  - долговечность  $n_0$  [3]. Необходимость создания экономного по материало- и энергоемкости оборудования, переход к системе его обслуживания по фактическому техническому состоянию, вынужденное стремление обезопасить выработавшие амортизационный срок конструкции, которые невозможно заменить, заставили обратиться к более ясным для потребителя показателям ресурсного происхождения. Изучение физической природы надежности материалов и конструкций привело к появлению новых уравнений предельного состояния. Процессы развития повреждений различного типа и природы могут быть объединены в рамках ресурсной механики, которая характеризуется такими принципами.

Проектирование на заданный ресурс, когда размеры сечений устанавливаются по долговечности, а не проверяются по запасам прочности.

При эксплуатации поддержание безопасности осуществляется по концепции поэтапного назначения ресурса.

При этом ВБР оценивается на основании ресурсного подхода.

Таким образом, ресурсная механика машин изучает ресурсные свойства, как механических систем в целом, так и ее элементов в отдельности [4].

В отличие от аппарата запаса прочности, ресурсная механика эффективно воспринимает новые возможности по углублению расчетов, открывающиеся с появлением современных пакетов автоматизированного проектирования. Иходя из концепции поэтапного назначения ресурса, методология его оценки должна обладать свойством уточнения прогноза. То есть параметры рассеяния итоговой функции распределения долговечностей должны быть чувствительны не только к изменению средних исходных показателей эксплуатационного процесса и сопротивляемости механической

системы, но и к вариации этих показателей, меняющейся после наработки.

Идея реализации машин посредством ресурсной механики состоит в том, что объекты проектируются на гарантированно назначенный ресурс, а в процессе эксплуатации, благодаря идентификации моделей старения (выявление детерминированной компоненты в априорно стохастических свойствах эксплуатационного процесса и механической системы), происходит переоценка технического состояния, устанавливается более точный (с меньшим рассеянием) исходный ресурс, а далее определяется последовательность остаточных ресурсов. Это дает возможность спроектировать материалоекономное изделие с требуемым уровнем надежности, а на стадии эксплуатации – обеспечить безопасность при наиболее полном исчерпании ресурса (рис.1).

### **Приемы ресурсной механики в аспекте информационных технологий**

Осуществление концепции ресурсной механики требует изменения содержания этапов проектирования. Остановимся на некоторых особенностях, связанных с информационными технологиями. В частности, об использовании программ анализа напряженно-деформированного состояния по МКЭ. Они обладают большими возможностями. Пользователи этими программными продуктами могут решать задачи, которые раньше являлись предметом исследований научных коллективов. Наглядность и всесторонность представления результатов убеждают в их достоверности. Однако, необходимо иметь в виду, что указанные программы чувствительны к подготовительным процедурам вычислений и результаты могут разниться на сотни процентов. В ответственных ситуациях расчетчик должен убедиться в приемлимости результатов и доказать это заказчику, произведя сопоставительный расчет иными методами. Такой поверочный расчет может быть сделан для одной расчетной схемы.

Пример ответственного подхода к использованию средств CAD связан с Институтом подвижного состава (Россия), где осваивается программа Fatigue, предназначенная для расчета долговечности при циклическом нагружении [5]. Процесс освоения заключается не столько в изучении правил работы с программой, а в

экспериментальной проверке результатов и объяснении обнаруженных расхождений.

Одним из условий оптимально-поискового проектирования является выполнение многовариантных расчетов, охватывающих весь диапазон возможных рабочих ситуаций, в том числе и аварийных, когда возникают перегрузки. Результаты многовариантных расчетов объединяются в факторные модели, которые позволяют отсеять второстепенные причины, выявить значимые факторы и установить оптимальные параметры системы.

Многовариантные расчеты позволяют на стадии проектирования сформировать режим нагружения элементов конструкций с учетом эксплуатационной и конструкционной нестационарности процесса. Обычно общая нагруженность машины задается в виде частотного спектра, что требует значительного объема экспериментальных данных. При этом реально в таком режиме конструкция не работает и прогнозирование долговечности получается с недостаточными для целей ресурсной механики достоверностью и точностью. Итоговые спектры являются результатом суперпозиции эргодичности процессов, наблюдаемых при одном технологическом режиме обработки продукции конкретного типоразмера. Целесообразно в таком виде и представлять общую нагруженность, где вариация ступеней регламентируется эксплуатационными свойствами сопротивляемости рабочего вещества обработке (рис. 1, а). Еще более точный прогноз дает переход к нагруженности деталей в виде двухступенчатых блоков, учитывающих историю нагружения (последовательность напряжений основного процесса  $\sigma_\phi$  и выбросов-перегрузок  $\sigma_n$ ) и ее конструкционную нестационарность (рис. 1, б). Последняя также устанавливается при помощи многовариантных расчетов. В результате мониторинга эксплуатационного процесса уменьшаются коэффициенты вариации чисел циклов фактической наработки  $n_L$  и возможной долговечности  $n_o$  (рис. 1, в).

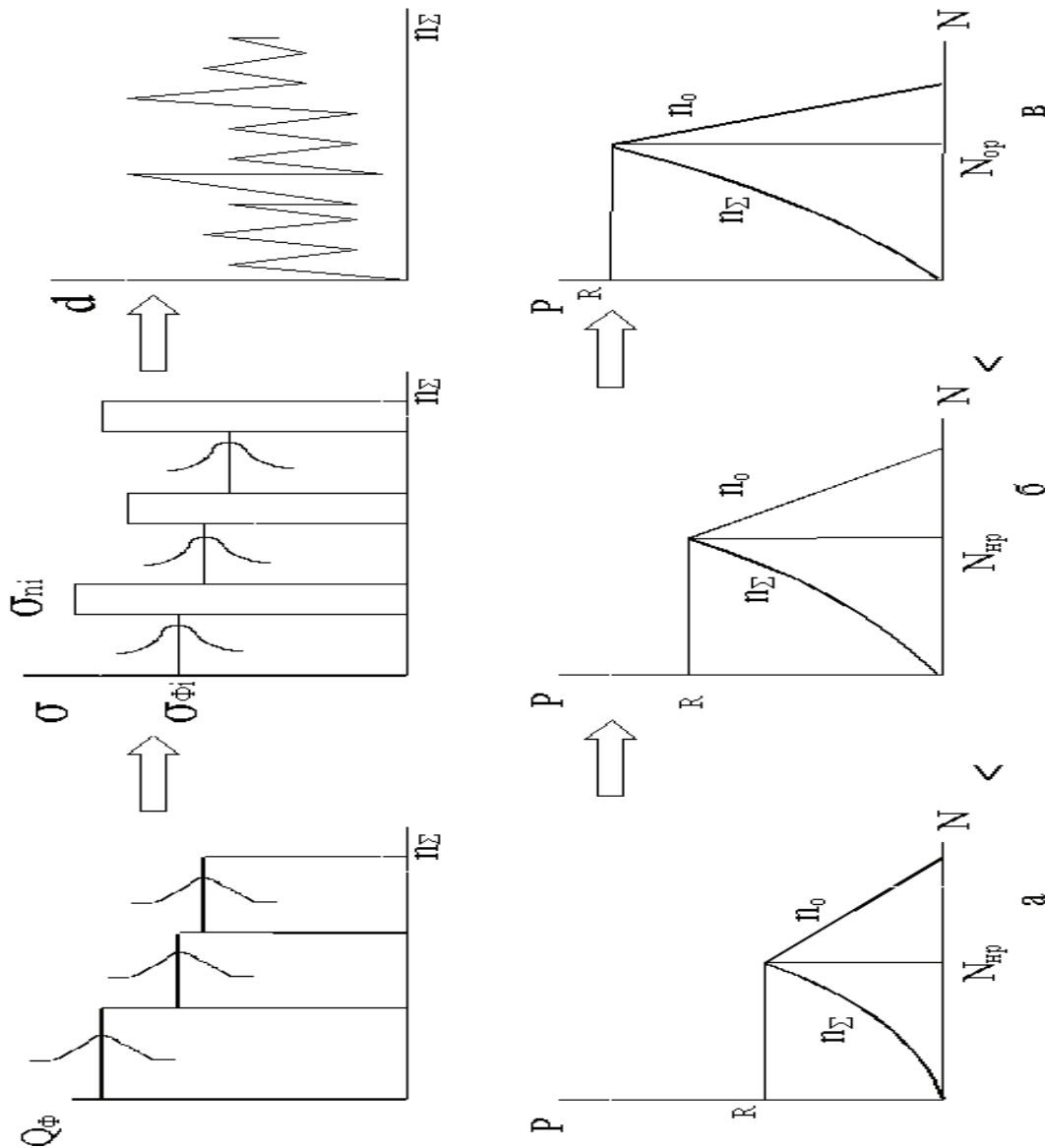


Рисунок 1 - Укрупненная схема реализации концепции поэтапного установления назначенного  $N_{np}$  (а), исходного  $N_{up}$  (б), и остаточного  $N_{or}$  ресурса для вероятности  $P$ , ведущей к росту безопасности  $R$ , определяемой при сравнении функции распределения числа циклов наработки  $n_\Sigma$  и долговечности  $n_o$ , путем замены спектра общей нагруженности  $Q_\phi$  (а) многорежимным макроблоком напряжений  $\sigma_\phi$  и  $\sigma_n$  (б), который трансформируется в процесс накопления повреждений  $d$ .

Вследствие многофакторности процесса усталости, довольно сложно по заданным нагрузкам и сроку службы установить размеры, форму и материал детали. Решить аналитически задачу проектирования на заданный ресурс возможно для простых деталей, работающих в стационарном режиме нагружения. Проще выполнить данный этап посредством предварительного построения для типовых конструктивных элементов (галтель, резьба, проушина) эксплуатационно-конструкционных диаграмм долговечности (ЭКДД).

Это есть график зависимости основного размера конструктивного элемента  $A$  от гарантированной долговечности  $n_0$  для действующей формы блока нагружения (рис. 2, I). Блок имеет повреждающую характеристику  $y$ , для которой величина  $A$  играет роль масштаба (рис. 2, II). Возможность существования и применения ЭКДД обусловлена различной интенсивностью накопления повреждений для зон с различным уровнем концентрации напряжений  $K$ . благодаря наличию в ЭКДД зависимости  $K(n_0)$  при параметре  $A_i$  удобно проектировать элементы конст-

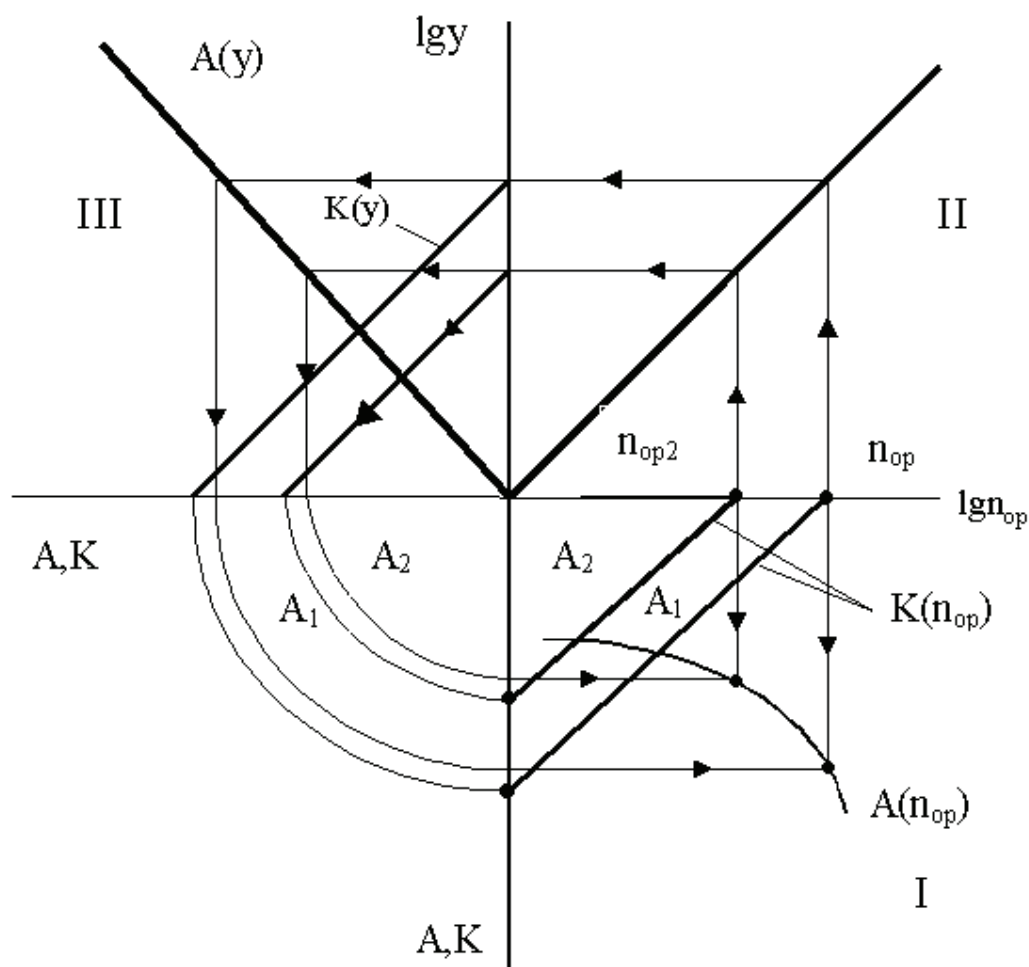


Рисунок 2 - Принцип образования эксплуатационно-конструкционных диаграмм долговечности  $n_0$  для надежности  $P(I)$  при помощи повреждающей характеристики процесса  $y$  (II) применительно к циклическому нагружению деталей, имеющих коэффициент снижения сопротивления усталости  $K$  и размер сечения  $A(I)$ .

рукций по критерию равнодолговечности, что повышает коэффициент использования металла при эксплуатации. Наличие подобных диаграмм повышает информативность конструктора и избавляет его от проведения нетипичных расчетов. Проблема

разработки ЭКДД связана, главным образом, не с отсутствием экспериментальных данных, а с большим массивом вычислений.

### **Заключение**

Для решения указанных проблем на кафедре машин и агрегатов металлургического производства НМетАУ разработаны программы поиска функций распределения долговечностей для блоков с перегрузками на основе метода статического моделирования; нахождения гарантированной долговечности зубчатых передач; нахождения гамма-процентного ресурса подшипников качения; выбора конструктивных параметров опорных роликов металлургических агрегатов. Применение приемов оптимизационно-поискового проектирования, наличие многовариантного расчета обязательно для дипломных проектов студентов-механиков с 1996 года, когда на кафедре начали обучать системам автоматизированного проектирования.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Волков Б. Н., Кремьянский В. Я. Унификация деталей машин. – М.:Изд-во стандартов. 1989. –229 с.
2. Смит С. Вероятностные критерии проектирования цилиндров и сфер, нагруженных термическими напряжениями //Конструирование и технология машиностроения. –1984. - №4. – с. 39-45.
3. Мониторинг состояния технологического оборудования и ресурсные подходы к диагностическим моделям /С. В. Беледеденко, В. Ю. Богдан, Е. И. Хребто, А. В. Ларионцев//Металлург. и грнорудн. пром-ть. 2007. - №6. – с.
4. Альгин В. Б. Ресурсная механика как основа прогнозирования и обеспечения износо-усталостной надежности машин //Трибофатика: Тр. 4 междунар. симпозиума. – Тернополь, 2002. – с. 55-60.
5. Бунин Б. Б., Шашкова Е. В. Особенности применения современного программного обеспечения для расчета долговечности деталей машин//Деформация и разрушение материалов: Сб. статей I междунар. конф. – Москва, 2006 – с. 598-600.

Получено 21.03.2008 г.