

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МАШИН И ПРОБЛЕМА РЕСУРСА

*НИРУП "Белавтотракторостроение" Национальной академии наук Беларуси
Минск, Беларусь*

Введение. Проектирование по своей сути является поиском оптимального решения, что представляется очевидным положением. Однако в реальной практике пока не используются методики, которые позволяют спроектировать оптимальную систему машин, отдельно взятую машину, ее компоненты и сопровождают весь процесс проектирования, начиная с обоснования концепции машины и заканчивая оптимизацией по признанному критерию. Обзор работ по данной тематике приведен в [1 — 4]. Основная причина — недостаточная методическая проработанность проблемы.

Прежде всего, следует ответить на вопрос, правомерно ли сводить проектирование к процедуре оптимизации по определенному критерию, каким должен быть критерий оптимизации?

Второй аспект проблемы состоит в том, что в учебных курсах, научных подходах и на практике сложилось разделение машиностроительной науки на теорию функциональных свойств, конструирование и расчет. Поэтому вопросы обеспечения функциональных и ресурсных свойств машин рассматриваются и решаются изолированно. При этом наиболее сложна проблема ресурса. Даже у производителя, как правило, нет отчетливых представлений, каким ресурсом обладает его техника и каким образом подтвердить заявленные ресурсные свойства.

Указанные вопросы являются предметом данной статьи.

Проблема оптимизации. Проблема оптимизации включает обоснование рассматриваемой системы и критерия (см. таблицу), а также метода решения.

Таблица

К проблеме оптимизации

<i>Глубина и характер моделей</i>	<i>Критерий</i>
В основном функциональные модели	Основанный на точке зрения одного субъекта
<i>В перспективе</i>	
Ресурсно-функциональные с учетом условий эксплуатации как общим фактором, охватывающие полный жизненный цикл системы	Основанные на интересах сети взаимодействующих экономических субъектов ... Глобальная сеть

Обоснование рассматриваемой системы — это глубина используемых моделей, описывающих связи в самой системе и ее окружении в пространстве, времени и на группе объектов. В настоящее время при рассмотрении машин и систем машин преобладает уровень функциональных моделей, а при учете ресурса обычно используются данные, объявляемые производителем. Как первый шаг углубления —

введение ресурсной модели и ее связи с функциональной моделью через условия эксплуатации. И далее построение модели полного жизненного цикла системы с все более широким учетом технических, экономических и экологических последствий.

По критерию на сегодня в как правило имеем точку зрения одного субъекта и оптимизируем с его точки зрения. Как первый шаг — учет позиций производителя и потребителя. В наиболее глубоких критериях — учет интересов всех субъектов экономической деятельности. Решения при этом могут быть из области Парето-оптимальных.

Здесь можно сослаться на одну из современных экономических теорий — институционализм [5]: попытки искать единственное оптимальное решение проблем неизбежно вызовут реакцию тех субъектов, чьи интересы прежде не учитывались. Институционализм не отрицает необходимости поиска оптимальных решений, но допускает в отличие от неоклассической теории существование нескольких точек равновесия или их отсутствие. При этом наряду с анализом гипотетических условий равновесия исследуются процессы, обеспечивающие реальное достижение оптимального результата.

Проектирование оптимальной системы машин. При рассмотрении системы машин, предназначенной для выполнения определенного вида работ необходимо определиться со степенью детализации моделей. Характерные уровни системы представлены на рис. 1.

На сегодняшний день в полном объеме постановка оптимизационной задачи с учетом всех уровней пока не реализована. И при решении этой задачи, прежде всего, следует определиться, с чьей позиции проводится оптимизация: производителя или пользователя. Кроме того, информация *об условиях эксплуатации* машин и понятия оптимального комплекса машин у производителя и пользователя могут существенно отличаться.

В свете CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) — концепции и идеологии информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях, — пользователь (заказчик) машин может решать самостоятельно или совместно с производителем техники следующую задачу: для заданного набора работ сформировать (спроектировать) комплекс машин на основе узлов; считаются известными начальные затраты на создание (использование) машин и узлов всех типов и затраты на выполнение машинами работ каждого вида. Предполагается, что суммарные затраты на разработку изделий и выполнение всех видов работ (включая эксплуатационные затраты пользователя) должны быть минимальными. Схема решения показана на рис. 2.

В приведенном варианте [3, 4] весь требуемый объем по каждой работе удовлетворяется одной машиной. При этом не детализируются ее производительность и ресурс. А учет этих факторов существенно изменяет решение задачи.

Покажем на примере этой задачи, каким образом изменяется решение в зависимости от глубины используемых моделей.

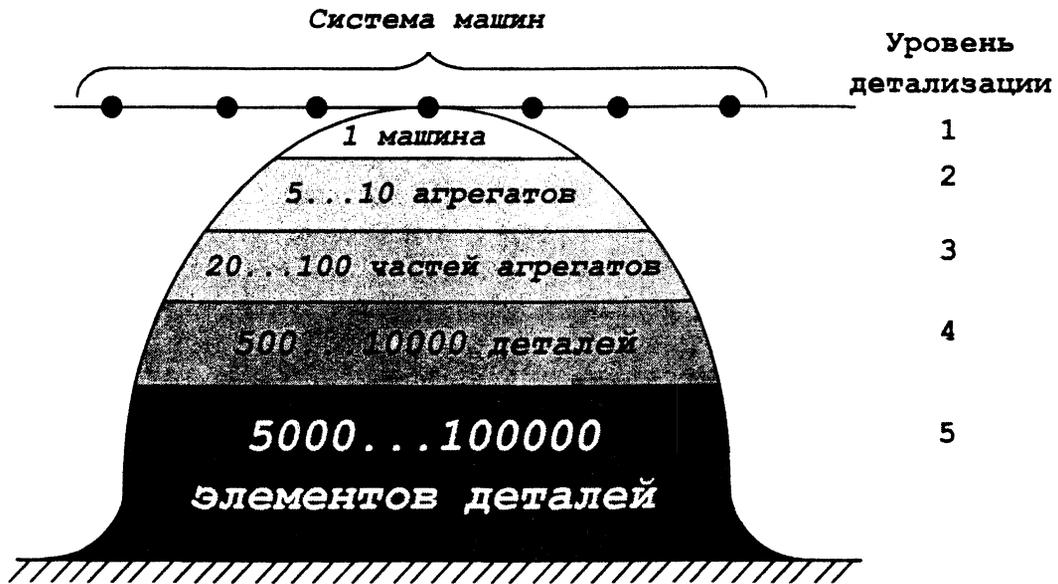


Рис.1. Уровни детализации моделей для задачи проектирования системы машин

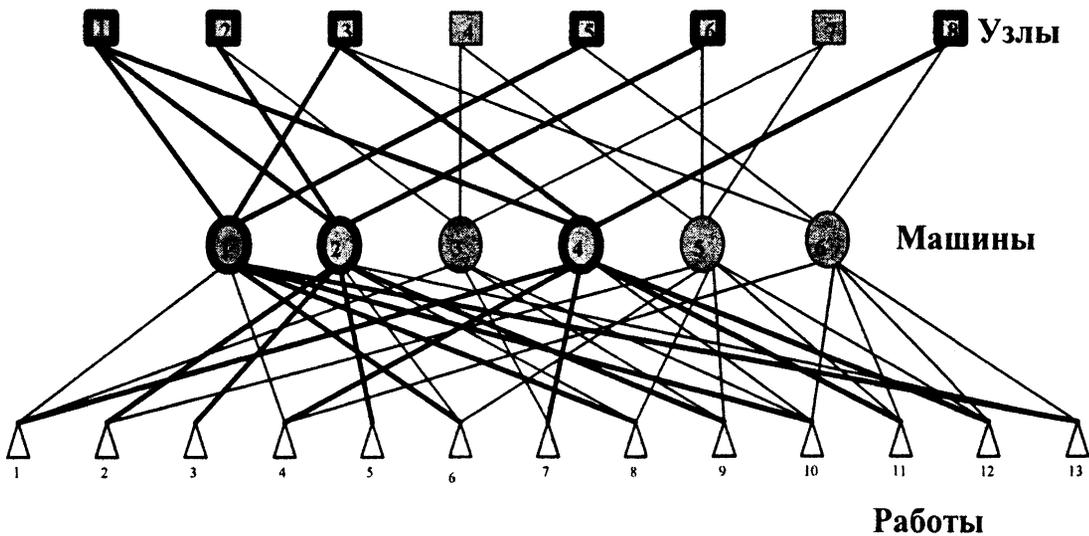


Рис.2. Схема решения задачи проектирования оптимальной системы машин, начиная с уровня узлов (оптимальное решение выделено жирными линиями)

Введем T_p — планируемый период производства; B_j — необходимый годовой объем по j -му виду работ; a_{kj} — известная (заданная) относительная продолжительность (доля времени) работы k -й машины в j -х условиях эксплуатации, $j=1, \dots, K$; здесь K — число видов работ (условий эксплуатации); W_{kj} — производительность k -й машины при выполнении j -го вида работ; t_{ikj} — ресурс i -го узла в составе k -й машины при выполнении j -го вида работ.

Ресурс машины сложным образом определяется через ресурсы составляющих ее узлов. Будем полагать, что известна процедура определения T_{kj} — ресурса k -й машины в j -х условиях эксплуатации в зависимости от t_{ikj} , $i=1, \dots, N$, здесь N — число узлов в составе k -го комплекта. И эта процедура используется в процессе поиска оптимального решения в рассматриваемой задаче

$$T_{kj} = f_{kj}(t_{1kj}, t_{2kj}, \dots, t_{Nkj}). \quad (1)$$

После определения T_{kj} общий ресурс k -й машины T_k рассчитывается по формуле

$$T_k = 1 / \sum (a_{kj} / T_{kj}). \quad (2)$$

Рассмотрим задачу выбора машин для двух видов работ, которые могут быть выполнены: вариант 1 — специализированными машинами (машины 1 и 2) и вариант 2 — универсальными машинами (машина 3). Первая машина выполняет работ первого вида, вторая машина — второго, третья машина выполняет оба вида работ. Производительности W_{kj} и ресурсы (средние) T_{kj} всех машин ($k=1, \dots, 3$) в рассматриваемых условиях (видах работ, $j=1, 2$) одинаковы.

Случай 1 (ресурсный фактор). Решение зависит от абсолютных значений входных данных, поэтому зададим следующие значения: $T_p = 10$ лет; $K=2$; $B_1=B_2=1000$ ед./год; $a_{11} = 1,0$; $a_{12} = 0$; $a_{21} = 0$; $a_{22} = 1,0$; $a_{31} = 0,5$; $a_{32} = 0,5$; $W_{kj} = 1$ ед./ч; $T_{kj} = 10000$ ч; стоимость специализированной машины примем 50000 у.е., универсальной 60000 у.е., остальные составляющие затрат (по вводу узлов и машин, эксплуатационные затраты) — одинаковы для всех машин.

На первый взгляд кажется, что вариант с универсальной машиной имеет очевидное преимущество — достаточно одной машины вместо двух. Однако учет ресурса существенно изменяет ситуацию.

Общие ресурсы машин T_k , рассчитанные по формуле (2), равны $T_1=T_2=T_3=10000$ ч. В первом варианте для выполнения 10-ти летнего объема работ (20000 ед. или 20000 ч работы машин при производительности $W_{kj} = 1$ ед./ч) достаточно двух специализированных машин. Во втором, поскольку одной универсальной машины хватает только на пять лет, потребуется также две машины. Затраты по варианту со специализированными машинами на 20000 у.е. меньше. Можно учесть, что еще ряд факторов, но ясно, что очевидного преимущества второй вариант не имеет и необходим дополнительный анализ.

Случай 2 (сочетание производительности и объема). Предположим, что производительность универсальной машины несколько ниже, чем специализированных машин: $W_{11} = W_{22} = 1,0$; $W_{31} = W_{32} = 0,9$ ед./ч. Тогда объем машинного времени для выполнения 10-летнего объема работ составит 22222 ч. Следовательно при ресурсе в 10000 ч потребуется уже три универсальных машины.

Случай 3 (ограничение по производительности и фактор безотказности). Для условия второго варианта введем ограничение на время выполнения работ, что можно косвенно выразить через производительность: $W_{kj} \geq 1$ ед./ч, и несколько уменьшим период производства: $T_p = 9$ лет (последнее не принципиально, а для упрощения). В рассматриваемом случае, казалось бы, вариант с универсальными машинами совсем проигрышный, т.к. с самого начала необходимо использовать две универсальные машины. Однако если важно выполнять годовые (сезонные) работы в жесткие сроки, то помимо ресурсного фактора (долговечности) отдельных машин следует ввести в рассмотрение показатели безотказности системы машин. В этом случае вариант с двумя универсальными машинами может оказаться предпочтительнее при учете экономических последствий отказов машин, например, в процессе уборки сельхозпродукции.

Проектирование оптимальной машины. В качестве критерия оптимальности при проектировании отдельной машины в [1, 2] рассмотрены технический критерий (критерий качества), критерий цена/качества (как переходной от чисто технического критерия к технико-экономическому) и технико-экономический критерий. Последний предлагается определить как *затраты на выполнение годового набора работ с учетом исчерпания ресурса машины*

$$E_y = E_{L1} x_1 + E_{L2} x_2 + \dots + E_{LK} x_K. \quad (3)$$

Здесь $E_{Lk} = Q_{1k} + Z_{1k} + S_h / W_k$ — затраты на выполнение единицы k -го вида работ (единицы работы в k -х условиях), x_k — объем работ в k -х условиях; Q_{1k} и Z_{1k} — затраты на топливо и оператора при выполнении единицы работы в k -х условиях эксплуатации; W_k — производительность (часовой объем работ).

Стоимость одного часа работы машины по всему ее жизненному циклу

$$S_h = (C_0 + C_{12}) / T, \quad (4)$$

где C_0 — цена; C_{12} — стоимость эксплуатации и утилизации; T — прогнозируемый ресурс машины в условиях выполняемого набора K работ.

Общая схема проектирования с целью минимизации выражения (3) представлена в [2]. Для реализации схемы оптимального проектирования предлагаются следующие положения.

Машина — это потребляющая энергию система, состоящая из компонентов (подсистем), в общем случае основанных на различных технических принципах, но объединенных в комплекс, реализующая определенную техническую функцию (функции) и наделенная ресурсом, проявляющимся при выполнении технической функции (при эксплуатации).

Производитель — интегратор энергетических, функциональных и ресурсных свойств технических подсистем машины: можно предположить ситуацию, когда производитель собирает машину из готовых поставляемых блоков (подобно сборке компьютеров).

Модели подсистем — неотъемлемая часть поставки самих подсистем. Поставка моделей предшествует физической поставке подсистемы. Модели используются при синтезе машины в процессе проектирования.

Поставщики — собственные подразделения производителя или сторонние организации. И те, и другие имеют доступ к модели условий эксплуатации машины, формируемой производителем.

Функции производителя (разработчика) как системного интегратора:

- Синтезировать условия эксплуатации и связанные с ними параметры внешних нагрузочных режимов;
- Моделировать поведение (энергетическое, функциональное и ресурсное) компонентов (подсистем) в составе машины в прогнозируемых условиях эксплуатации, а также оценивать их стоимость как в случае сторонней поставки, так и при изготовлении собственными силами;
- Формировать полную модель машины и предоставлять пользователю до поставки или вместе с поставкой машины.

Оптимальное проектирование компонентов (узлов, агрегатов) можно рассматривать в рамках приведенных выше общих моделей оптимизации машин, как решение, оптимизирующее общий критерий. Отдельное рассмотрение задачи оптимизации компонента, строго говоря, не имеет смысла, если не определены достаточно точно условия его использования. Массово производимые компоненты машин обычно имеют преимущества перед оригинальными в силу своей дешевизны. Однако оригинальные компоненты могут обладать характеристиками, более подходящими в техническом отношении. При оценке перспективных вариантов компонентов целесообразно ориентироваться на следующий комплекс параметров: соответствие функциональным требованиям, энергопотребление, ресурс, стоимость, включая эксплуатационные затраты.

Проблема ресурса. Идея создания *равнопрочной машины*, которая разрушалась бы одновременно по всем своим составным частям, была и остается несбыточной. В машинах, содержащих созданные из различных материалов компоненты,

подвергающиеся различным видам нагружения и различным разрушительным процессам, это неосуществимо из-за неопределенности условий и режимов эксплуатации и разброса свойств материалов. К тому же, проектировать все составные части машины на один и тот же ресурс нецелесообразно экономически.

Можно обеспечить машине *вечный ресурс*, заменяя ее составные части, которые достигают предельного состояния (ПС). В реальной практике понятие ПС имеет *договорной, декларативный* характер. Заинтересованные стороны (производитель и пользователь, или один из них) формируют критерии, по каким признается достижение машиной ПС. В некоторых случаях критерии ПС формируются не для машины в целом, а для ее компонентов.

Анализ материалов по определению ресурса автомобильной, тракторной, строительно-дорожной, пожарной и других видов техники показывает, что само понятие ресурса до предельного состояния машины в них трактуется по-разному. При этом для квалификации факта исчерпания ресурса привлекаются разнообразные показатели: технические, экономические, физические и другие.

Возникает вопрос, нужно ли вообще рассматривать и определять ресурс машины в целом? Может быть, ограничиться ресурсами агрегатов? Возможно построение критериев и на основе учета предельных состояний отдельных агрегатов (без перехода к ресурсу машины в целом). В представленных выше задачах и используемых критериях ресурс машины относится к основным показателям и существенно определяет результат решения. Поэтому рассмотрение проблемы ресурса машины имеет как научный, так и практический интерес.

При описании предельного состояния машины и ее составных частей будем исходить из того, что возможны две ситуации: первая, когда предельное состояние компонента приводит к предельному состоянию системы (подсистемы), в которую входит компонент; вторая — не приводит. Во втором случае для квалификации ПС используется более сложная логика по сравнению с определением ресурса объекта по наиболее слабой его составной части.

Предельное состояние машины, ее составной части следует отличать от случая прекращения ее эксплуатации. Декларировать предельные состояния машины должен производитель, а решение о прекращении эксплуатации принимает пользователь. При этом наиболее естественным представляется подход, когда предельное состояние машины описывается производителем на основе технических критериев, т.е. через предельные состояния агрегатов, последних — через предельные состояния узлов, а их в свою очередь — через детали. Деталь с ресурсной точки зрения должна быть описана через ПС ее конструктивных элементов, каждый из которых наделен определенной несущей способностью. Эти критерии физически проверяемы и объективны. Потребитель для принятия решения о прекращении эксплуатации машины может использовать любые соображения (технические, экономические, нравственные и т.д.).

С методической точки зрения к принципиальным положениям по моделированию, оценке и обеспечению ресурса относятся:

- описание ресурса машин и ее компонентов в вероятностном аспекте (говорить о ресурсе вне связи с вероятностью не имеет смысла) [6];
- описание ресурса машины и ее компонентов в связи с условиями эксплуатации [6];
- учет вариации условий эксплуатации множества машин и соответствующая вероятностная модель спектра условий эксплуатации [7] (см. рис. 3,а);
- построение ресурсного расчета по схеме “условия эксплуатации — ресурс” взамен традиционной схемы “нагрузочный режим — ресурс” [8] (см. рис. 3,б).

- учет зависимости ресурсов у компонентов машины от общего фактора — условий эксплуатации, а также других зависимостей (принцип ресурсно-зависимого поведения элементов в нагруженной механической системе) [6];

- квалификация ПС машины на основе иерархической модели и сложной логики ПС компонентов и реализация соответствующей расчетной схемы [9, 10];

- интеграция ресурсного расчета в общую процедуру моделирования ресурсно-функциональных свойств машины [1, 2].

Реализация оптимального проектирования машин. *Организационной основой* оптимального проектирования машины и системы машин является использование CALS-идеологии и приходящей ей на смену идеологии PLM (Product Lifecycle Management) — “нового управления жизненным циклом изделий”. В свете PLM наряду с изменениями в технологиях интеграции приложений и архитектуре корпоративных систем предприятие рассматривается как единая управляемая система, обеспечивающая параллельную работу конструкторов, технологов, менеджеров, а также непрерывную поддержку связей с заказчиком (пользователем).

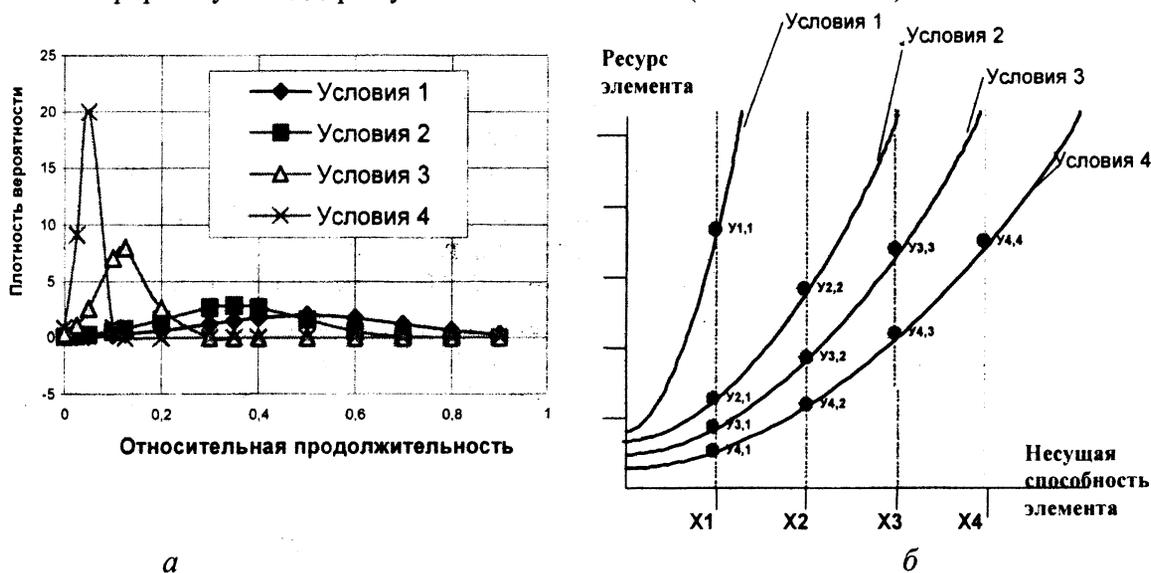


Рис. 3. Вероятностное представление спектра условий эксплуатации (а) и вид ресурсно-прочностных кривых (б)

Теоретическая основа — модель ресурсно-функциональных свойств машин как основа имитационного моделирования жизненного цикла технических объектов, основанная на вероятностной идеологии теории надежности. При этом необходимо воспроизведение действия основных общих факторов, в первую очередь, условий эксплуатации, как глобального общего фактора во многом определяющего ресурсные и функциональные свойства технических объектов. Отдельные элементы модели могут быть аналитическими, но присутствие имитационных составляющих — обязательное условие для реализации связей, в общем случае проявляющихся на группе компонентов (деталей, работающих в общем режиме, и т.п.) во времени и пространстве.

Заключение. Сегодня становится все более очевидным, что машиностроительные предприятия превращаются в компьютерные центры, деятельность которых направлена на организацию синхронной и параллельной работы собственных разработчиков и поставщиков компонентов с целью быстрого и экономичного вывода на рынок конкурентоспособной техники. Постоянно демонстрируются и рекламируются преимущества предлагаемых новых решений. При этом большое значение имеет разработка и использование критериев для оценки техники.

В работе представлены и обоснованы критерии для проектирования оптимальной системы машин и отдельной машины. Однако не менее принципиальным положением является сам подход, основанный на согласованном воспроизведении ресурсных и функциональных свойств машин под действием общих факторов. Фактически речь идет о создании на базе теории надежности более широкой теории, включающей вероятностное всестороннее описание полного жизненного цикла машин.

Оценка ресурса играет одну из ключевых ролей в проектировании оптимальных машин. Необходимо также отчетливо представлять и обосновывать уровни используемых при проектировании моделей. Анализ данных факторов приводит к целесообразности рассмотрения и разработки концепции “повторного использования техники” или даже концепции “вечной техники”. Дополнительным обоснованием сказанного являются работы по модернизации дорогостоящих технических объектов, например, в авиастроении и кораблестроении, мобильной военной техники, которые получают в настоящее время все большее развитие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альгин В.Б. Расчет и оценка машины как ресурсно-функциональной системы// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления. Сборник научных трудов. Вып. 1. В 3-х т.— Т.1/ Под общей ред. П.А.Витязя. — Минск: УП “Технопринт”, 2002. (Сб. научных трудов первой Международной научно-технической конференции г. Минск, 11—13 декабря 2002 г. (пленарные доклады)). — С. 85—88; 2. Альгин В.Б. Проектирование как оптимизация ресурсно-функциональных свойств машин в свете CALS// Механика машин. Теория и практика. Материалы междунар. науч-техн. конф., Минск, 10—11 февраля 2003 г. — Минск: НИРУП “Белавтотракторостроение”, 2004. Там же. — С. 209 — 222; 3. Альгин В., Гимади Э., Долгий А. Проектирование системы машин для заданных объемов и типов работ// Там же. — С. 132 — 140; 4. Algin V.B., Gimadi E. Kh., Goncharov E. N., Dolgui A. Optimal design of machines dedicated to a given set of jobs// Discrete Optimization Methods in Production and Logistics (DOM'2004): 2nd International Workshop; proceedings (Omsk – Irkutsk, 20-27 July, 2004). Omsk: Nasledie Dialog-Sibir Pbs., 2004. — P.33-38; 5. Васильева Е.Э. Институционализм как альтернатива неоклассической и марксистской экономической теории// Квартальный бюллетень клуба экономистов. Вып. 4. — Минск: изд. “Пропилей”, 2000. — С. 164—180. — www.ipm.by/pdf/b4_vas.pdf; 5. Альгин В.Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин. — Минск: Навука і тэхніка, 1995. — 256 с; 7. Альгин В.Б., Богдановский И.Г. Вероятностная модель спектра условий эксплуатации мобильной техники// Вестник Могилевского государственного технического университета. 2001. №1. — С. 14—17; 8. Альгин В. Необходимый этап перехода. От расчетов деталей — к ресурсной механике машин// Инженер-механик, 2000. № 3. — С. 21—23; 9. Альгин В.Б., Вербицкий А.В., Суворцев А.И. Схемы предельных состояний и расчет ресурса машин// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления. Сб. научн. тр. Вып. 1. В 3-х т. —Т.2 — Минск: УП “Технопринт”, 2002. — С. 344—348; 10. Альгин В.Б., Суворцев А.И. Программный комплекс для расчета ресурса механических систем// Механика машин. Теория и практика. Материалы междунар. науч-техн. конф., Минск, 10—11 февраля 2003 г. — Минск: НИРУП “Белавтотракторостроение”, 2004.— С. 286 — 297.