1544729

Московский, ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Васильев Герман Николаевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИИ ВАРИАНТНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ПРИ ЗАДАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Специальности: 05.03.01 -процессы механической и физико-химической обработки, станки и инструмент;
05.13.12 -системы автоматизации проектирования в машиностроении.

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Москва 1994 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты -доктор технических наук, профессор Горнев В.Ф.

-доктор технических наук, профессор Петров А.В.

-доктор технических наук, профессор Султан-Заде Н.М.

Ведущее предприятие -АО "МосСКБ АЛ и АС"

Защита состоится "18" мая 1994 г. в 14³⁰ час на заседании Совета Д 053.15.04 Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на авто
печатью, просим направ
С диссертацией м
им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разо

Ученый секретарь специализированного Совета, кандидат технических наук

Подписано в печать
22.03.94г.

1544729

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обеспечение заданных показателей точности и производительности при минимизации трудовых и материальных затрат на производство и эксплуатацию является основной задачей при проектировании технологического оборудования, от решения которой зависит эффективность функционирования всего машиностроительного комплекса.

Для анализа стоимостных и других показателей в работе были использованы данные до 1991 года включительно. Так на 1991 год металлоемкость продукции машиностроения в 1,5 ,а в некоторых случаях в 2,...,3 раза превосходила металлоемкость аналогичных зарубежных образцов. На единицу потребительских свойств продукции машиностроения в среднем расходовалось материальных ресурсов в 1,5 раза больше, чем в ведущих зарубежных странах. Лишь 12,... ...,14 % эксплуатируемых машин соответствовали техническому уровню зарубежных аналогов, при этом 60,...,62 % техники страна продавала себе в убыток. Все это в полной мере относится и к продукции станкостроения как основы машиностроения.

1544729

Для повышения эффективности машиностроительного комплекса наряду с разработкой новых конструкций станков и станочных узлов большое значение приобретает проблема повышения эффективности методов проектирования на базе использования методов оптимизации и методов САПР. Наибольшая эффективность проектных решений достигается при оптимизации конструкции дорогостоящего оборудования. В машиностроении таким оборудованием являются станки с ЧПУ, которые служат основой для построения самых дорогостоящих производственных систем -гибких. С другой стороны полученные при этом модели оптимизации являются наиболее универсальными, так как этот вид оборудования является самым сложным по конструкции отдельных узлов и средств автоматизации.

Показателями качества конструкции на этапах проектирования приняты жесткость станка и его узлов, динамическая точность системы ЧПУ, быстродействие вспомогательных узлов, производительность станка или станочной системы. Показатели экономической эффективности конструкции: масса или себестоимость узлов, себестоимость станка или приведенные затраты станочной системы.

Модели оптимизации станочных узлов, которые используются в практике станкостроения, в основном сводятся к параметрической

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1544729
Васильев Г.Н. Разработка м
МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

оптимизации (параметрический синтез), после выбора конструктивной схемы узла (т.е. процедура структурного синтеза обычно неавтоматизирована). Кроме того, применяемые методы и модели не позволяют решать задачу назначения технических требований к каждому узлу станка, исходя из заданных требований на станок или станочную систему в целом, что в свою очередь не позволяет обеспечить автоматизацию процесса синтеза станочных узлов.

В случае многовариантного исполнения узлов выбор наилучших конструктивных решений станка или станочной системы обычно сводится к простому перебору комбинаций вариантов узлов на на основе морфологической таблицы, это приводит к получению неоптимального варианта конструкции станка или станочной системы из-за неограниченного числа вариантов.

Цель работы- повышение эффективности проектирования металлорежущих станков, особенно на начальных стадиях проектирования, путем сокращения материальных и трудовых затрат на производство и эксплуатацию проектируемого оборудования в результате выбора оптимальных вариантов конструкции станочных узлов при обеспечении заданных показателей оборудования по точности и производительности и сокращения сроков его проектирования за счет автоматизации процедуры структурно-параметрического синтеза конструкций.

Достижение поставленной цели потребовало создания методологии оптимизации вариантного конструирования станочных узлов, которая позволяет при заданных требованиях по показателям точности и производительности станка выбрать соответствующие исполнения его узлов из вариантного ряда конструкций. При этом необходимо было решить следующие задачи: построение модели оптимизации конструкции станочных узлов при одновременном варьирования структурных и параметрических переменных; формализация описания вариантного ряда конструкций отдельных узлов с учетом целевой функции и ограничений модели оптимизации станка в целом; одной из основных задач САПР на начальных этапах проектирования-задачи назначения технических требований к отдельным станочным узлам, исходя из требований к параметрам производительности или точности обработки на станке; разработка метода структурно-параметрического синтеза конструкций; формирование моделей оптимизации конструкции станочных узлов при задании различных показателей качества станка (точности, производительности, точности и производительности), для различных подсистем станка (несущей

системы, системы вспомогательных механизмов и системы ЧПУ); разработка математического и программно-методического обеспечения автоматизации процесса выбора вариантов станочных узлов.

Методы исследования. Основные положения работы базируются на современных методах расчета производительности станков и станочных систем (СтС), жесткости узлов и динамической точности систем ЧПУ. При этом использовались: теория производительности машин и систем машин, теория упругости, теория автоматического управления. Формирование методов, моделей и программ оптимизации конструкции станочных узлов осуществлялось на основе алгоритмов автоматизированного проектирования, методов оптимального проектирования конструкций и методов нелинейного математического прграммирования.

При отработке математических моделей и методов оптимизации станочных конструкций был выполнен большой объем вычислительных работ, связанных с обработкой данных, моделированием и оптимизацией станочных узлов и механизмов на аналоговых и цифровых вычислительных машинах (машинные эксперименты) с использованием численных методов решения нелинейных алгебраических уравнений, методов регрессионного анализа и теории математического моделирования. Проводились экспериментальные исследования положений работы, связанные с оценкой динамической точности системы ЧПУ.

Научная новизна. Разработана методология двухуровневой оптимизации (МДО) конструкции узлов в составе металлорежущих станков с заданными параметрами точности и производительности. Основу методологии составляет структурно-параметрический синтез, позволяющий автоматизировать процесс выбора оптимального варианта конструкции.

Методология включает:

- модель структурно-параметрической оптимизации, где ограничения определяются заданными показателями точности и производительности, а целевой функцией является функция "качество - эффективность" конструкции или наборов вариантов конструкции станочных узлов (функционал качества);
- метод баланса градиентов (БГ-метод);
- методику формирования регрессионных структурно-параметрических моделей станочных конструкций;
- алгоритм двухуровневой оптимизации конструкции станочных узлов (структурно-параметрический синтез конструкций);

-методика декомпозиции станка или станочной системы на подсистемы и узлы.

Предлагаемая методология обеспечивает оптимизацию станочных узлов при их вариантном исполнении в составе компоновки станка или станочной системы. Таким образом впервые предложен метод структурно-параметрической оптимизации (синтеза) конструкции станочных узлов (при одновременном изменении структурных и параметрических переменных модели оптимизации).

Последовательное применения МДО позволяет реализовать и многоуровневую оптимизацию станочных конструкций. С другой стороны БГ-метод, который является ядром МДО, может применяться самостоятельно для оптимизации конструкции отдельных узлов.

Практическая ценность. На базе разработанной методологии оптимизации получены аналитические и графические зависимости, а так же конкретные значения конструктивных параметров, которые могут быть использованы в практике проектирования станочных узлов. Результаты работы являются математической и программно-методической основой для создания подсистем синтеза конструкций в САПР станочных узлов.

МДО позволяет получить параметры конструкции металлорежущих станков, обеспечивающих заданные параметры точности и производительности при снижении их металлоемкости, трудоемкости изготовления, капитальных и эксплуатационных затрат, а также при сокращении цикла техической подготовки за счет эффективности принимаемых решений и автоматизации проектирования.

Методология двухуровневой оптимизации может быть использована при создании унифицированных структурно-параметрических рядов конструкций станочных узлов по уровню качества (жесткости, быстродействию, допустимым силовым нагрузкам и т.д.).

Предложенный метод баланса градиентов обеспечивает дополнительные возможности, связанные с оценкой направления изменения параметров, необходимости того или иного конструктивного изменения, значимости переменных модели оптимизации, кроме того БГ-метод имеет и самостоятельное значение как метод одноуровневой оптимизации конструкции.

Разработанное программно-методическое обеспечение позволило сформировать среду SAVAK (Система Автоматизации ВАриантного Конструирования) для выбора конструкции станочных узлов на всех этапах проектирования. На начальных этапах проектирования при

наличии одновариантного набора конструкций станочных узлов может быть использована методика оптимизации в аналитическом виде.

На основе результатов работы подготовлено 18 учебных и методических пособий, которые используются в учебном процессе. Из них три учебных пособия издано через центральные издательства. Одно учебное пособие (в соавторстве) в 1989 г. отмечено дипломом и третьей премией ГКНЮ СССР.

Результаты работы внедрены на заводах, НИИ и конструкторских бюро.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на 14 всесоюзных конференциях и семинарах. Полное содержание работы доложено на заседаниях кафедры МТ-1 ("Прецизионные станки и станочные модули") МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва: 1984, 1991, 1992,1994 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 48 печатных работ, в том числе одна монография и 9 авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 196 наименований и приложений. Общий объем 506 страниц, в том числе 275 страниц основного текста, 107 рисунков, 55 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены проблемы оптимизации конструкции металлорежущих станков с ЧПУ. Выбор варианта конструкции станка и его отдельных узлов на этапах проектирования является наиболее ответственной задачей, особенно при разработке автоматизированного оборудования, когда ошибки при выборе конструкции узлов приводят к значительным трудовым и материальным потерям.

Большой вклад в развитие методов вариантного конструирования технологического оборудования внесли Аверьянов О.И., Бушуев В.В., Врагов Ю.Д., Левин А.И., Оптиц Г., Шпур Г., Цвикки Ф. и др. В этих работах в основном сформулированы приемы декомпозиции технологических машин на отдельные узлы или подсистемы и методы генерирования вариантов конструкции. С помощью перебора и оценки вариантов станка по показателям качества из этих вариантов отбираются наиболее предпочтительные.

Одним из методов вариантного конструирования является

метод агрегатирования технологических машин и систем машин из унифицированных модулей, узлов и деталей. В случае отсутствия системы унифицированных узлов и модулей, наборы варианты узлов задаются конструктором, а генерирование вариантов конструкции станка производится с помощью морфологической таблицы.

Другим направлением повышения эффективности технологического оборудования является оптимальное проектирование его узлов. Вопросам оптимизации конструкции отдельных станочных узлов посвящены работы Евсигнеева В. В., Г. Н. ,Каминской В. В., Каневского Г. Н. ,Левиной З. М. ,Лизогуба В. А., Пуша А. В. ,Хомякова В. С. и др. Расчетные алгоритмы в этих задачах в основном строятся на базе методов параметрической оптимизации.

Задачи вариантного конструирования и оптимального проектирования решаются последовательно: сначала выбирается конструктивная схема станочного узла, а затем производится его параметрическая оптимизация. С другой стороны вариантный ряд конструкций может быть построен на основе одного и того же конструктивного исполнения как параметрический ряд на основе методов параметрической оптимизации.

При автоматизация процесса проектирования выбор варианта конструкции соответствует структурному синтезу, а оптимальное проектирование -параметрическому синтезу. Для обеспечения заданного качества конструкции процедуры структурного и параметрического синтеза могут неоднократно повторяться.

Основы разработки САПР технологического оборудования заложены в работах Калинина В. В. ,Левина А. И. ,Половинкина А. И., Прохорова А. Ф. и др. В этих работах показано, что задача синтеза конструкции станочных узлов может быть поставлена только после решения задачи назначения технических требований к уровню показателей качества этих узлов в зависимости от заданного уровня качества системы старшего иерархического уровня (станок, подсистема станка, производственная система). Таким образом проблема оптимизации вариантного конструирования является задачей многоуровневой оптимизации.

Основными показателями качества, которые задаются в техническом задании на проектирование станка являются показатели точности и производительности. Расчет показателей точности станков излагается в работах Кедрова С. С., Кудинова А. В., Нахапетяна К. Г., Подураева В. Н., Портмана В. Т., Проникова А. С.,

Решетова Д. Н., Чернянского П. М. и др. В свою очередь назначение параметров точности станка производится на основе теории точности обработки резанием, сформированной в работах Базрова Б. М., Балакшина Б. С., Дальского А. М., Корсакова В. С., Соколовского А. П. и др. По показателям точности могут быть отобраны узлы, которые участвуют в процессе формообразования детали.

Особенностья анализа конструкции станочных узлов на этапах проектирования с точки врения точности является использование жесткости в качестве показателя или критерия расчета. С одной стороны жесткость станка или его отдельных узлов может определять значительную долю погрешности обработки детали в виде упругих деформаций для станков нормальной точности. С другой стороны остальные составляющие погрешности обработки детали такие как геометрические погрешности станка или тепловые деформации станка, не могут быть определены из-за отсутствия необходимой информации на этапах проектирования.

Производительность станка рассчитывается, исходя из требуемой производительности станочной системы. В отличии от модели точности станка, которую можно рассматривать как двухуровневую, модель производительности является по крайней мере трехуровневой, так как выбору подлежат конструкции узлов станка, определяющие его производительность, конструкции подсистем станочной системы и структурные параметры СтС. Вопросы выбора структуры станочных систем рассматривались в трудах Владзиевского А. П., Кошкина Л. Н., Шаумяна Г. А., которые получили дальнейшее развитие в работах Волчкевича Л. И., Горнева В. Ф., Дащенко А. И., Клусова И. А., Лищинского Л. Ю., Черпакова Б. И. и др.

Особенностью вариантного конструирования станков с ЧПУ является участие узлов системы ЧПУ как в формировании точности станка, так и формировании его производительности. Основным параметром, определяющим выбор параметров узлов системы ЧПУ является ее динамическая точность. Но с другой стороны динамическая погрешность ограничивает производительность станка так как она зависит от скоростей и ускорений, с которыми перемещаются рабоие органы станка с ЧПУ, что особенно характерно для станков с контурными системами управления. Причем динамическая погрешность системы ЧПУ может быть рассчитана на стадии проектирования.

Для оценки экономической эффективности проектных решений

используется большое число показателей, например, для корпусных деталей станков - масса конструкций, для станочных узлов и станка в целом-себестоимость, для станочных систем- приведенные затраты. Себестоимость узлов является наиболее универсальным критерием, однако ее определение на начальных этапах проектирования сопряжено со значительными трудностями. Расчеты себестоимости проектируемых конструкций приведены в работах Дабагяна А. В., Илатова Ю. Л., Ковалева А. П., Колобова А. А., Моисеевой Н. К., Просвирякова А. В. и др. В этих работах показано, что основой расчета себестоимости конструкций является трудоемкость их изготовления.

В заключении первой главы сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, посвященной оптимизации вариантного конструирования металлорежущих станков.

Во второй главе разрабатывается методология оптимизации вариантного конструирования станков с ЧПУ. Предложена концепция оптимального конструирования станков с ЧПУ в составе производственной системы. Составлена структурная схема станка с ЧПУ, включающая: систему управления (устройство ЧПУ, приводы подач,...), вспомогательные узлы и механизмы (смены инструмента и заготовок, накопители деталей и заготовок,...), несущая система станка (корпусные детали и узлы, узлы привода,...), процесс резания (заготовка, инструмент, параметры процесса резания,...), системы верхнего уровня (транспортная система; система ремонта и обслуживания; система складирования инструмента, заготовок и деталей; система управления,...).

Проведен анализ критериев оценки конструкторских решений при проектировании станка с ЧПУ. Эти критерии разбиты на две группы: критерии качества (точность, производительность,...) и критерии эффективности (стоимость, приведенные затраты,...). Показатели точности и производительности станка обеспечиваются выбором конструктивного исполнения станочных узлов и структуры системы управления. С другой стороны необходимо иметь в виду возможность настройки и коррекции системы ЧПУ и выбора алгоритма ее управления.

Концепция оптимального конструирования станков с ЧПУ включает общие принципы и положения при построении: иерархической структуры станочной системы, модели оптимизации станочных узлов, системы критериев и ограничений, набора вариантов узлов и кон-

структивных элементов, способов и средств достижения заданного качества конструкций. Иерархическая структура СтС: станочная система - подсистемы СтС - станок - подсистемы станка - станочные узлы - конструктивные элементы и детали. Модель оптимизации станочных систем- многоуровневая, но ее можно представить в виде совокупности двухуровневых моделей: станочная система - подсистема СтС, подсистема СтС - станок, станок - подсистема станка и т.д. В формировании показателей точности станка участвуют узлы несущей системы станка и система ЧПУ. Производительность станка обеспечивает система вспомогательных узлов и механизмов и система управления. Производительность СтС определяется уровнем производительности оборудования и числа станков. Обеспечение заданных показателей точности станка и производительности СтС достигается вариантным конструированием станочных узлов, и подсистем станка и СтС при минимизации материальных и трудовых затрат на разработку, производство и эксплуатацию оборудования.

Модель оптимального конструирования станочных узлов имеет вид

$$F(\bar{\gamma}) \longrightarrow \min, \quad g(\bar{\gamma}) = g_0 \qquad (1)$$

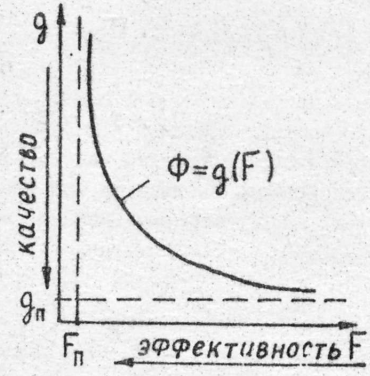


Рис. 1. Функционал качества.

где $F(\bar{\gamma})$ - функция эффективности, $g(\bar{\gamma})$ - функция качества, g_0 - заданный уровень качества, $\bar{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_к)$ - вектор варьируемых переменных (структурных и параметрических).

Для обеспечения инвариантности модели (1) от вида переменных вводится функция Ф=g(F), рис. 1, называемая в дальнейшем "функционал качества", которая определяет набор вариантов конструкции с различными значениями показателей качества и эффективности g и F. Функционал имеет вид гиперболической функции с асимптотами $g_п$ и $F_п$ (предельные характеристики набора конструкции).

Параметрами метода баланса градиентов, разработанного для

решения задачи (1) являются координаты вектора градиента функционала качества, Φ ($grad\ \Phi$)

$$\nabla\Phi = grad\,\Phi = (A_1, A_2, \ldots, A_K) \qquad (2)$$

Для непрерывных переменных параметрические производные

$$A_i = \left.\frac{\partial\Phi}{\partial F}\right|_{\gamma_i} = \frac{\partial g/\partial\gamma_i}{\partial F/\partial\gamma_i} = \left.\frac{\partial g}{\partial F}\right|_{\gamma_i} \qquad (3)$$

Для дискретных (параметрических и структурных) переменных

$$A_i = \left.\frac{\partial\Phi}{\partial F}\right|_{\gamma_i} \approx \frac{\Delta g_i/\Delta\gamma_i}{\Delta F_i/\Delta\gamma_i} = \frac{\Delta g_i}{\Delta F_i} \qquad (4)$$

Критерий оптимальности конструкции

$$A_1 = A_2 = \ldots = A_K = A_0 < 0$$

где $A_0 = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} A_i$ или $A_0 = \sqrt[K]{\prod_{i=1}^{K} A_i}$ (5)

Таким образом решение задачи оптимизации (1) сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений $(i = \overline{1,n-1})$

$$\begin{cases} A_i - A_0 = 0 \\ g(\bar{\gamma}) - g_0 = 0 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} A_i - A_{i+1} = 0 \\ g(\bar{\gamma}) - g_0 = 0 \end{cases} \qquad (6)$$

Поскольку основным критерием метода решения задачи (1) является (5), он назван методом баланса градиентов. Задача (1) может быть решена методом множителей Лагранжа. Тогда система уравнений, которую необходимо решить записывается в виде ($\mathcal{L}$ – функция Лагранжа, $\mathcal{L} = F + \mu(g - g_0)$, μ – множитель Лагранжа)

$$\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\gamma_i} = 0: \frac{\partial F}{\partial\gamma_i} + \mu\frac{\partial g}{\partial\gamma_i} = 0 \quad \text{или} \quad \left.\frac{\partial g}{\partial F}\right|_{\gamma_i} = -\frac{1}{\mu}$$

Так как производные функционала качества равны $-\frac{1}{\mu}$, значит все они равны между собой и выполняется соотношение (5), для которого $A_0 = -\frac{1}{\mu}$. Таким образом БГ-метод является одним из методов множителей Лагранжа.

Далее анализировались методические особенности и возможности БГ-метода. Для обеспечения структурно-параметрической оптимизации конструкции должны быть построены функции $g(\bar{\gamma})$ и $F(\bar{\gamma})$, которые включают структурные и параметрические переменные. Пос-

кольку вектор $\nabla\Phi$ не зависит от вида переменных, то при решении задачи (1) могут быть найдены значения как параметрических, так и структурных переменных. Можно производить оценку направления оптимизации, если $|A_i| > |A_0|$, то параметр необходимо увеличивать, при $|A_i| < |A_0|$ -наоборот уменьшать. Переменные исключаются из модели оптимизации при $|A_i| \gg |A_0|, |A_i| \ll |A_0|$. Можно производить оценку эффективности изменения конструкции

$$\Delta F = \Delta g / A_0; \text{ ПРИ } g = g_0 \mp \Delta g, \qquad F = F^* \pm \Delta F, \; F^* = \min F \tag{7}$$

Основным достоинством ВГ-метода является возможность реализации двухуровневой оптимизации. Для этой цели имеющиеся наборы вариантов конструкции узлов станка описываются регрессионными моделями их функционалов качества. Для набора вариантов i -того узла уравнение регрессии функционала качества порядка имеет вид

$$F_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{K_{ij}}{(g_i - g_{ni})} + F_{ni} \tag{8}$$

Пусть модель оптимизации системы верхнего иерархического уровня (сборка) имеет вид (- число узлов в сборке)

$$F = \sum_{i=1}^{n} \beta_i F_i \to \min, \quad \sum_{i=1}^{n} \alpha_i g_i - g_0 = 0 \tag{9}$$

где α_i, β_i - весовые коэффициенты; g_0 - заданный уровень качества сборки; g_i, F_i - функции качества и эффективности узлов, входящих в сборку.

Тогда решение задачи (9) сводится к системе уравнений в итерациях ($\hat{g}_i = g_i - g_{ni}$; $i = \overline{1, n-1}$)

$$\hat{g}_i = \hat{g}_{i+1} \sqrt{\frac{\alpha_{i+1}\beta_i \sum_{j=1}^{m}(m-j+1)K_{ji}\hat{g}_i^{j-1}}{\beta_{i+1}\alpha_i \sum_{j=1}^{m}(m-j+1)K_{ji+1}\hat{g}_{i+1}^{j-1}}}$$

$$g_n = (g_0 - \sum_{i=1}^{m} g_i \alpha_i)/\alpha_n \tag{10}$$

При $m=1$, $n=2$ система уравнений (9) имеет аналитическое решение ($i=1,2$; $j=2,1$)

$$g_i^* = \frac{(g_0 - \alpha_j g_{nj})\sqrt{\beta_i K_{1i}/\alpha_i} + g_{ni}\sqrt{\alpha_i \beta_j K_{1j}}}{\sqrt{\alpha_i \beta_i K_{1i}} + \sqrt{\alpha_j \beta_j K_{1j}}} \tag{11}$$

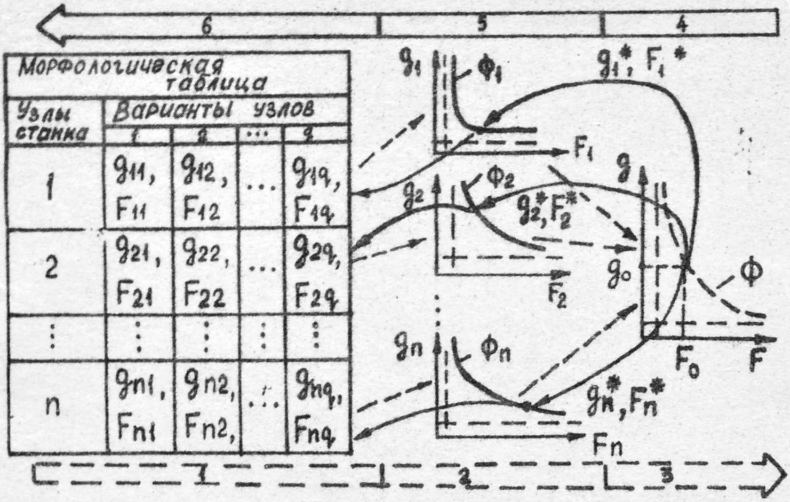


Рис. 2. Последовательность двухуровневой оптимизации конструкции станочных узлов.

На рис. 2 показана схема, иллюстрирующая алгоритм двухуровневой оптимизации, который включает этапы 1,2,3 (проектирование "снизу - вверх") и этапы 4,5,6 (проектирование "сверху- вниз"). Наборы узлов представлены в виде морфологической таблицы вариантов конструкций. На этапе 1 для каждого варианта рассчитываются значения показателей g_{ij}, F_{ij} (i - номер узла, j - номер варианта). На этапе 2 формируются регрессионные модели функционалов качества наборов вариантов узлов $g_1(F_1), g_2(F_2), \ldots, g_n(F_n)$ с помощью метода наименьших квадратов. На этапе 3 формируется функционал качества сборки узлов $g(F)$. Этап 4 обеспечивает решение задачи оптимизации типа (9). В результате решения задачи (9) получаем оптимальные значения g_i^*, F_i^*, по которым определяются конкретные конструктивные исполнения узлов. БГ-метод применяется на этапах 1,4,6. На этапе 1 с помощью БГ-метода могут формироваться оптимальные наборы узлов. На этапе 4 на основе БГ-метода производится оптимизация сборки узлов. В случае, если значение g_i^* не совпадает ни с одним значением из ряда $g_{i1}, g_{i2}, \ldots, g_{iq}$, то на этапе 6 БГ-методом необходимо получить параметры конструкции, обеспечивающие g_i^*.

Таким образом задача оптимизации вариантного конструирования станков с ЧПУ в зависимости от исходных требований формируется как последовательность одноуровневых (Oi) и двухуровневых (Dij) задач оптимизации.

В главе третьей МДО используется для оптимизации структуры автоматических линий и оптимизации вариантного конструирования станочных модулей и станков с ЧПУ заданной производительности Qo.

Известные примеры оптимального проектирования автоматических линий обычно используют методику пошагового отбора вариантов. Для сопоставления возможностей МДО и пошаговой оптимизации с отсечением наихудших вариантов рассматривалась модель автоматической линии (а. л.) для обработки ступенчатых валов, разработанная Л.И. Волчкевичем:

$$Q_0 = \frac{480 p \gamma_3}{t_p + t_в + (t_u + q t_o) W(n)/n} \qquad (12)$$

$$F = [E(C_0 + C_1 q + C_2 n) + З] p$$

где Q - сменная производительность а. л. (шт\смену); p - число потоков; γ_3 - коэффициент загрузки; n - число участков; q -число позиций; tp -время рабочих ходов; tв - время вспомогательных ходов; tи, to- потери по инструменту и оборудованию; W(n)- коэффициент возрастания потерь из-за ограниченной вместимости накопителей; $E = Eн + \alpha_1 + \alpha_2$; Eн - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; α_1 -коэффициент амортизационных отчислений; α_2 - коэффициент затрат на текущий ремонт и межремонтное обслуживание; $C = Co + C_1 q$ - стоимость транспортной системы; C_2 -стоимость накопителей; З - годовой фонд зарплаты обслуживающего персонала.

Процедура приведения модели (12) к виду удобному для использования БГ -метода включает введение регрессионных моделей tp(q) и W(n). Линейная регрессия tp(q) имеет вид

$$t_p = \frac{K}{q - q_п} + t_п \qquad (13)$$

где tп и qп - предельные значения параметров tp и q , K - коэффициент регрессии.

Исходная модель (12) преобразуется к виду (W(n)=1)

$$F(q, n, p) \longrightarrow min$$
$$t(q, n, p) - 480\gamma_3/Q_0 = 0 \qquad (14)$$

где $t = \frac{1}{p}\left[\frac{K}{q-q_n} + t_n + t_в + \frac{t_u + q t_o}{n}\right]$

Qo - заданная сменная производительность а. л.

Решение модели (14) сводится к решению системы уравнений типа (6), для которой функционал качества а. л. $\Phi = t(F)$, а его производные $\partial t(q)/\partial F(q)$, $\partial t(n)/\partial F(n)$, $\partial t(p)/\partial F(p)$. Для решения модели (14) на ПЭВМ была составленна программа П2.5 (Приложение 2). В результате вычислений по программе П2.5 получается таблица параметров структуры а. л. с учетом округления полученных непрерывных значений q , n и p . На основе этой таблицы выбираются варианты структуры а. л. с параметрами наиболее близкими к оптимальным значениям q , n , p и обеспечивающие Q=Qo.

На онове БГ - метода могут быть получены и аналитические зависимости для параметров. Так для числа участков а. л.

$$n = \frac{t_o(q-q_n) + \sqrt{t_o^2(q-q_n)^4 + 4K_1(t_u + q t_o)C_1/C_2}}{2K_1/(q-q_n)} \qquad (15)$$

Были разработаны программы на ПЭВМ с учетом регрессионных моделей W(n) и с учетом станков-дублеров (П2.6, П2.7). Сконструированы модели, включающие дополнительные факторы: число обслуживающего персонала а. л. , тип транспортной системы и т. д.

Рассматривались также модели оптимизации станков с ЧПУ и и станочных модулей заданной производительности Qo. Производительность станка с ЧПУ в условиях мелкосерийного или серийного производства оценивается либо по типовой детали-представителю, либо по интегральным характеристикам комплекта деталей, закрепленных за данным станком. В том и другом случае производительность станка (Qcp) оценивается по усредненным показателям комплекта деталей.

В ряде случаев необходимо использовать расчет производительности по каждой детали комплекта обрабатываемой на станке с ЧПУ (Qк). Для оценки области использования Qcp и Qк была построена модель набора деталей с диапазоном затрат времени на обработку наименее трудоемкой и наиболее трудоемкой длетали (tmin, tmax), характеризующаяся знаменателем геометрической прогрессии $q_к$: $t_{max} = q_к^{n_к - 1}\, t_{min}$ ($n_к$ -число деталей в комплекте). Тогда

$$Q_{cp} = \frac{2}{t_{max} + t_{min}}, \quad Q_к = \frac{t_{min}(q_к^{n_к} - 1)}{n(q_к - 1)}$$

Погрешность расчета по Qcp

$$\Delta Q = \left[1 - \frac{2(q_K^{n_K} - 1)}{n_K(q_K - 1)(q_K^{n_K-1} + 1)}\right] 100\% \qquad (16)$$

Анализ зависимости (16) показал, что для каждого $n_K \geqslant 3$, существует значение q_K, при котором Qср с достаточной точностью определяет производительность станка с ЧПУ при обработке комплекта деталей. Так при ΔQ 5 %, n_K=3,...,10 параметр q_K=1,77-1,11.

Для декомпозиции станка или станочного модуля были введены понятия основных, присоединенных, распределенных и неизменяемых подсистем. В соответствии с этим регрессионные модели функционалов качества строятся для основных подсистем, включая параметры присоединенных и распределенных подсистем. Присоединенная подсистема может быть зависимой и независимой. В случае независимой присоединенной подсистемы она может быть включена в состав модели любой основной подсистемы для увеличения мощности множества вариантов конструкции этой подсистемы. Зависимая присоединенная подсистема включается в состав только той основной подсистемы, от параметров которой зависят ее характеристики. В свою очередь параметры распределенных подсистем являются зависимыми от параметров основных и присоединенных подсистем. Параметры неизменяемых подсистем при оптимизации постоянны.

Время обработки одной детали на станке с ЧПУ

$$tc = tp + tпо + tси + tсз/p + (tпе + tпр + tб + tор)/z \qquad (17)$$

где tp -время рабочих ходов, tпо -время позиционирования, tси - время смены инструмента, tсз -время смены заготовки, p - емкость многоместного приспособления, tпе -время переналадки, tпр -простои по оборудованию и инструменту, tб -потери по браку, tор-потери по организационным причинам, z-число деталей в партии.

В соответствии с выражением (17) можно выделить три основных подсистемы станка с ЧПУ или станочного модуля: P1 -подсистема обработки, P2 -смены инструмента, P3 -смены заготовки. Соответственно функционал качества каждой из трех подсистем $\Phi i = ti(Fi)$, где Fi -приведенные затраты i-той подсистемы. Независимые присоединенные подсистемы: переналадки и диагностики узлов. Зависимые присоединенные подсистемы: активного контроля детали и контроля состояния режущего инструмента. Параметры распределенных подсистем: число координат системы управления, число обслуживающего персонала, площадь занимаемая оборудованием.

В результате оптимизации конструкции станочных подсистем

получаем функционал качества станка или станочного модуля Фс= =tc(Fc). Пусть этот функционал описывается линейным уравнением регрессии, тогда с учетом обеспечения производительности Qo, N одинаковыми станками модель оптимизации имеет вид

$$F=\left(\frac{K}{t_c-t_{cn}}+F_{cn}\right)N\longrightarrow min;\ t_c=\frac{480N}{Q_0} \qquad (18)$$

где Qc =480/tc -сменная производительность одного станка, Qcn =480/tcn -предельная производительность станка, K -коэффициент уравнения регрессии, Fcn- предельные приведенные затраты станка.

Решение модели (18) БГ-методом

$$\bar{t}_c^{*}=1+\sqrt{\bar{K}};\ N^{*}=Q_0\left(1+\sqrt{\bar{K}}\right) \qquad (19)$$

где $\bar{t}c^{*}$ =tc*/tcn, $\bar{K}$ =K/(tcn Fcn), Qo =Qo/Qcn

Коэффициент $\bar{K}$ определяет технико-экономический уровень конкретного набора вариантов конструкции станков: чем меньше K (при одинаковых tcn и Fcn),тем более эффективными и качественными являются конструкции станков, составляющие данный набор. Модель (18) определяет одноуровневую оптимизацию конструкции станка в результате чего получаем единственный оптимальный уровень производительности станка $Q^{*}=480/t^{*}$, не зависящий от заданной производительности Qo (при любом порядке уравнения регрессии функционала качества). Это же утверждение справедливо и для модели двухуровневой оптимизации конструкции станка :

$$F=\left[\sum_{i=1}^{n}F_i(t_i)+F_H\right]N\longrightarrow min$$
$$\left(\sum_{i=1}^{n}t_i+t_H\right)/N-480/Q_0=0 \qquad (20)$$

где n -число подсистем станка; Fi(ti)-регрессионные модели функционалов качества подсистем станка; Fн,tн-параметры неизменяемых подсистем.

Однако, если учитываются модели подсистем, обслуживающих станок или станочный модуль (даже неизменяемых) необходимо найти оптимальное соотношение между экстенсивным и интенсивным способами обеспечения заданной производительности Qo

$$F=\left[\sum_{i=1}^{n}F_i(t_i)\right]N+\sum_{j=1}^{\alpha}F_j(t_j)\longrightarrow min$$
$$\sum_{i=1}^{n}t_i/N+\sum_{j=1}^{\alpha}t_j-480/Q_0=0 \qquad (21)$$

где r -число подсистем, обслуживающих станок или станочный модуль, Fj(tj) -функционалы качества этих подсистем.

На основе модели (21) был построен алгоритм оптимизации числа деталей в партии запуска и объема склада деталей.

Четвертая глава посвящена оптимизации вариантного конструирования станочных узлов в составе несущих систем станков заданной жесткости. За основу была принята несущая система (НС) многоцелевого станка (МС) с вертикальной компоновкой для обработки корпусных деталей. Рассматривалось нагружение НС по отдельным координатам (X,Y и Z), по двум координатам и ее пространственное нагружение. Объекты оптимизации: стойка, механизмы приводов подач крестового стола (шариковые винтовые передачи-ВП) и шпиндельный узел (ШУ). Первый раздел главы формирует критерии оптимизации узлов несущей системы (МС). Функционал качества несущей системы станка и его отдельных узлов Ф= e(F), где e -податливость, F -себестоимость. Расчет себестоимости отдельных узлов производился по методике, разработанной А. А. Колобовым по формуле себестоимости проектируемого технологического оборудования

$$F=\left[M+3_0\left(1+\frac{K_1+K_2}{100}\right)+(K_3+K_4)\frac{3_0}{100}\right]\left(1+\frac{K_5}{100}\right) \quad (22)$$

где М -затраты на основной материал, полуфабрикаты и комплектующие изделия; Зо -основная зарплата производственных рабочих (определяется через общую технологическую трудоемкость изготовления станочного узла); K_1 , K_2 , K_5 -цеховые, общезаводские и прочие косвенные расходы в % ; K_3 и K_4 - коэффициенты дополнительной зарплаты и отчислений на социальное страхование в % .

Стоимость подшипников качения ШУ и ВП определялась по соответствующему прейскуранту. Трудоемкость изготовления станочных узлов рассчитывалась по материалам НПО Оргстанкинпром и данным станкостроительных заводов. Для шпиндельных узлов и шариковых винтовых передач с помощью программы П2.11 были получены регрессионные зависимости трудоемкости их изготовления в зависимости от конструктивных параметров. Стойка МС оптимизировалась по массе, которая затем пересчитывалась в ее себестоимость. Последующие три раздела главы посвящены одноуровневой оптимизации конструкции станочных узлв и формированию функционалов качества наборов вариантов их конструкции.

При оптимизации стойки МС рассматривались варианты ее наг-

1544729

МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

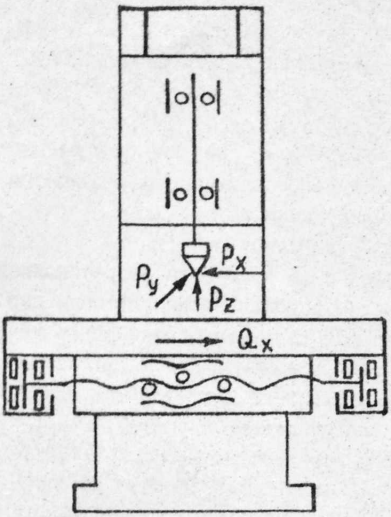


Рис. 3. Схема пространственного нагружения НС станка.

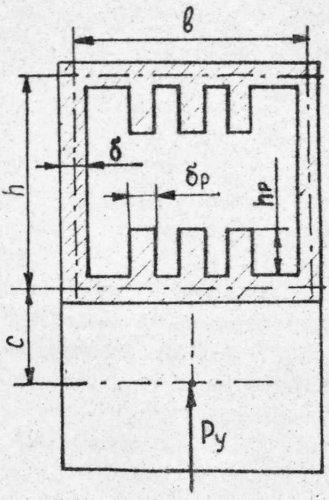


Рис. 4. Расчетная схема сечения стойки станка.

ружения по отдельным осям и в плоскости симметрии (рис. 3). Результаты оптимизации сопоставлялись с данными, рекомендуемыми другими авторами. Критерием эффективности являлась масса стойки - m. Так с учетом нагрузки только по оси Z (стойки вертикально-сверлильных станков) оптимальное соотношение параметров стойки (ребра отсутствуют, рис. 4), полученное БГ-методом ($\bar{h} = h/b$, $\bar{c} = c/b$): $\bar{h}^* = 1{,}5 + \sqrt{2{,}25 + 12\,\bar{c}}$. Сопоставление полученного и рекомендуемого соотношений: $\bar{h}^* \geqslant \bar{h}_0$ (h рекомендуемое Каминской В. В. составляет 2,...,3). При учете нагрузки только от силы Px оптимальное соотношение $\bar{h}^* = \sqrt{2\,\bar{c} + \bar{c}^2} - \bar{c}$. Рекомендуемое соотношение $\bar{h}_0 = 1$. Евстигнеевым В. Н. и Левиной З. М. в случае использования целевой функции F=e m получено оптимальное соотношение $\bar{h}_1 = \sqrt{2\,\bar{c}}$. Вычисления по программе П2.12 показали, что оптимальные значения h^* и b^*, полученные БГ -методом обеспечивают снижение металлоемкости стойки по сравнению с $\bar{h}_0$ и $\bar{h}_1$ на 7,...,20 % . При нагруже-

нии стойки в плоскости симметрии (силы Pz, Py) $\bar{h}^* > h_0$ (h_0 =2-3) где $\bar{h}^* = 1{,}5 + \sqrt{2{,}25 + 4(3\bar{\sigma} + 2\bar{lp})}$, $\bar{lp} = lp/b$ (lp -расчетная высота стойки). Для этого случая также рассматривалась эффективность введения ребер (рис. 4). Оптимальная сотношение высоты и толщины ребра $\beta^* = \sqrt{3h/\delta p + 2{,}25} - 1{,}5$; $\beta^* \geq \beta_0$ (β_0 =3,...,4). Используя свойства БГ-метода по оценке значимости переменных модели оптимизации было определено , что введение ребер (внутренних) менее значимо, чем увеличение параметров сечения h и b. С другой стороны увеличение числа ребер более значимо, чем увеличение толщины стенок δ . Построена регрессионная модель набора вариантов конструкции стоек при нагружении по оси X:

$e_1 = 0{,}028/(m - 0{,}2)^2$; где e_1 , даН/мкм; m ,т.

Для шариковых винтовых передач была построена регрессионная модель функционала качества с учетом использования винтовых пар по ОСТ2 Р31-1-80. Анализировалось три варианта монтажа опор ходовых винтов: 1 -с двусторонним закреплением винта и сдвоенными упорными подшпниками в опорах (рис. 3); 2 -с двусторонним креплением винта и одинарными упорными подшипниками в опорах; 3 - с односторонним креплением винта и сдвоенным упорным подшипником в опоре. Функционал качества набора шариковых винтовых передач Ф=e(F), где e -податливость ВП, F - себестоимость. Податливость ВП определялась с учетом податливости опор, винта, пары винт -гайка и схемы монтажа опор. Упорные подшипники -роликовые их жесткость принималась пропорциональной диаметру посадочного отверстия подшипника (тип подшипников также варьировался). Конструкция опоры предполагает регулирование ее жесткости с помощью проставочной втулки. Себестоимость ВП определялась по трудоемкости изготовления ее отдельных деталей. Номер схемы монтажа опор оказался более значимым, чем диаметр винта, поэтому функционалы качества были построены как функции диаметра винта при различных схемах монтажа опор и при различных длинах винта. Например, для схемы монтажа опор 1 и рабочей длине винта 900 мм функционал качества набора ВП (по диаметру винта): $e_2 = 0{,}0059/(F_2 - 0{,}18) + 0{,}008$; где e_2 , даН/мкм; F_2, т. руб.

Затем была построена модель оптимизации конструкции шпиндельных узлов на опорах качения. Функционал качества строился так же, как и для ВП. Варьировавались: конструкция опор ШУ, тип подшипников в опорах, межопорное расстояние, диаметр шпинделя,

число опор (2 или 3) и тип привода шпинделя. Из модели оптмизации были исключены тип привода и число опор как более значимые переменные и номер схемы передней или задней опоры как менее значимая переменная. Таким образом вариантный ряд двухопорных ШУ формировался по двум переменным: диаметр шпинделя и величина межопорного расстояния (программа П2.15). Пример функционала качества набора ШУ (передняя опора -сдвоенный подшипник с коническими роликами, задняя опора -одинарный подшипник с коническими роликами): $e_3 = 0,086/(F_3 - 0,5) + 0,004$. С помощью ВП -метода рассчитано оптимальное соотношение жесткости предней и задней опор, построены оценки необходимости изменения конструкци ШУ (установка третьей опоры, разгрузка привода шпинделя).

В последнем разделе четвертой главы реализована двухуровневая оптимизация конструкции станочных узлов при заданной податливости НС станка e_0. Рассматривались задачи оптимизации НС из двух (H_{12}) и трех (H_{13}) узлов при нагружении только по одной координате X (рис. 3) и задача оптимизации НС из четырех узлов (H_{24}) при нагружении по координатам X и Y. Задача H_{12} решалась аналитически по формуле (11) и графически для ВП и ШУ (функционалы качества наборов вариантов $e_2(F_2)$ и $e_3(F_3)$). Функционал качества набора вариантов H_{12} : $e_{12} = 0,137/(F_{12} - 0,68) + 0,012$. Задача H_{13} (оптимизация параметров конструкции ВП, ШУ и стойки) решалась с помощью программы П2.18 по алгоритму, при котором варьируется величина Ao согласно (5), по его значениям определяются F_i^*, а по ним вычисляются e_i^*. Так для исходных моделей $e_1(F_1)$, $e_2(F_2)$ и $e_3(F_3)$ алгоритм решения задачи H_{13} имеет вид $F_i^* = \sqrt{K_i/Ao} + F_{ni}$; $e_i^* = K_i/(F_i^* - F_{ni}) + e_{ni}$; $e_o = e_1^* + e_2^* + e_3^*$. Функционал качества набора конструкций H_{13} : $e_{13} = 0,225/(F_{13} - 0,88) + 0,012$. В задаче H_{24} оптимизируются конструкции ШУ, шариковых винтовых передач по координатам X ,Y и стойки. Причем производится одноуровневая оптимизация конструкции стойки, так как нельзя построить набор вариантов стойки оптимальных при нагружении по двум координатам. Модель задачи H имеет вид

$$F_{24} = \sum_{i=2}^{4} F_i(e_i) + \alpha_0(h+b) \rightarrow \min \qquad (23)$$
$$e_{ox} = e_3 + e_2 + e_{1x}(h,b);\ e_{oy} = e_3 + e_4 + e_{1y}(h,b).$$

где $F_i(e_i)$ -функционалы качества набора вариантов конструкций, e_{ox}, e_{oy} - заданные податливости по координатам X и Y, e_{1x}, e_{1y} -

- податливости стойки по координатам X и Y, e_4 - податливость ВП по координате Y, $\alpha_0(h+b)$ - себестоимость стойки.

Для решения задачи оптимизации H_{24} была составлена программа П2.19. В случае пространственной нагрузки задача оптимизации узлов H_{3q} сводится к решению задач H_{1i} и H_{2j}.

В пятой главе рассматривается оптимизация вариантного конструирования станочных узлов с учетом динамической точности системы ЧПУ. При этом рассматривается полная (комплексная) модель оптимизации, включающая узлы, параметры которых входят в модель точности станка и узлы, определяющие производительность обработки детали на станке. Параметры и стуктура системы управления станка входят как в модель точности станка, так и в модель его производительности. Наибольшее влияние на производительность и точность станков оказывают характеристики систем управления при обработке по контуру. Была построена экспериментальная установка на базе гидрофицированного станка 6М42К с контурной импульсно-следящей системой ЧПУ. По экспериментальным частотным характеристикам были определены передаточные функции приводов подач стола и салазок. Так передаточная функция по перемещению стола $W(p)=Ks/[p(Tp+1)]$, где p -оператор Лапласа, Ks -добротность по скорости, T -постоянная времени (T=0,0114 с). На основе этой установки были отработаны варианты структуры систем ЧПУ, кострукций приводов подач и их элементов, датчиков, ряд из которых был защищен авторскими свидетельствами. С помощью аналоговой ЭВМ, встроенной в систему ЧПУ реализовывались различные варианты коррекции и определялись ошибки слежения по координатам ε_x, ε_y и таким образом значения динамических погрешностей вносимых системой ЧПУ на контур детали. Так контурная погрешность δ_K при обработке круга $\delta_K = -\varepsilon_y \cos\varphi + \varepsilon_x \sin\varphi + (\varepsilon_x \varepsilon_y \sin 2\varphi)/2R$ (R -радиус круга, φ -фазовый сдвиг сигналов ошибки). С другой стороны было получено аналитическое выражение для определения контурной погрешности системы ЧПУ

$$\delta_K = \max_{t_3} \min_{t} |\rho_3(t_3) - \rho(t)| \qquad (24)$$

где t_3 и t -параметры заданного и полученного контура; $\rho_3(t_3)$ и $\rho(t)$ - радиус -векторы заданного и полученного контуров.

Анализ зависимостей, полученнх по формуле (24) для погрешностей при обработке типовых контуров показал, что в общем слу-

чая ошибка на контуре $\delta_K = Кд\ Sк$, где Кд -коэффициент динамической точности системы ЧПУ, Sк -подача по контуру. Так при обработке круга $Кд = [1-M(\omega_R)]/\omega_R$, $\omega_R = Sк/R$, $M(\omega) = |B(j\omega)|$ где $B(j\omega)$ -частотная передаточная функция замкнутой системы по одной координате. Причем в случае обработки плавных контуров коэффициент динамической точности может быть достаточно малой величины за счет выбора устройства коррекции и в основном Кд определяет динамическую точность при обработке участков контура детали с сопряжениями. При отработке "прямого угла" перемещения по координатам X и Y (при идентичных приводах подач по X и Y)

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{\delta_S}{p} - \frac{Sк}{p^2} B_\varepsilon(p)\right\};\quad y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{Sк}{p^2} B(p)\right\} \qquad (25)$$

где $\delta_S = Sк/Ks$ - установившаяся ошибка по скорости, $\mathcal{L}^{-1}$ - обратное преобразование Лапласа, $B_\varepsilon(p)$- передаточная функция ошибки. При отработке "прямого угла" возникают наружняя δ_H и внутренняя $\delta_в$ ошибки: $\delta_H = |\min x(t)|$, $\delta_в = \sqrt{2}\, x(t_1)$, $t_1 = 1/K_S$.

Формирование вариантов структуры и выбор параметров систем ЧПУ производится в соответствии с этапами расчета и формированием ее структуры (рис. 5). Оптимизация на этапе проектировании исполнтельного механиама (ИМ) заключается в согласовании параметров нагрузки и характеристик ИМ. На этапе проектирования силового привода подбирается усилитель мощности. Предложен алгоритм



Рис. 5. Последовательность проектирования системы ЧПУ станка.

структурного синтеза приводов подач станков с ЧПУ по критериям динамической точности с помощью бинарного дерева вариантов. Разработана обобщенная структурная схема привода подач станка с ЧПУ, на основе которой сформирована программа анализа динамических характеристик приводов подач станков с ЧПУ по переходной функции (П2.20). Рассчитаны оптимальные динамические параметры систем ЧПУ, обеспечивающие минимальные погрешности при отработке плавных траекторий (на основе разложения функции ошибки в ряд Тэйлора) и траекторий с сопряжениями (на основе интегральной квадратической оценки при скачке скорости). На основе моделирования контурных систем ЧПУ на аналоговых вычислительных машинах предложено самонастраивающееся устройство, реализующее двухструктурную систему ЧПУ, учитывающую различные требования к динамическим характеристикам систем ЧПУ при отработке плавных траекторий инструмента и траекторий с сопряжениями. С помощью пакета СИАМ на ПЭВМ проведено моделирование систем ЧПУ с адаптивными контурами по координатам. Найдены параметры корректирующего фильтра, включенного в адаптивн контур и обеспечивающего снижение установившейся погрешности по нагрузке при сохранении заданного запаса устойчивости системы ЧПУ. Таким образом вариантность системы ЧПУ и узлов привода определяется вариантами структуры системы управления и их динамическими параметрами в том числе параметрами устройств коррекции, что в совокупности определяет различные значения Кд.

Оптимизация вариантного конструирования системы ЧПУ (экстремальный контур) осуществляется совместно с другими подсистемами станка. Так для случая плавных контуров при обработке детали, с заданной погрешностью упругих деформаций δ_0 и производительностью станочной системы из N станков Q_0 модель оптимизации имеет вид (сила резания равна Кр Sк)

$$F = N \cdot F_H(e_H) \rightarrow min$$
$$\delta_0 = K_p e_H S_K ; \; Q_0 = 480N/(\ell_K/S_K + t_в) \qquad (26)$$

где Fн(e_H) - функционал качества несущей системы станка; ℓ_K - суммарная длина контура; $t_в$ - время вспомогательных ходов.

С помощью БГ- метода при линейной регрессионной модели Fн получаем оптимальное значение подачи по контуру

$$S_K^* = \left(\sqrt{\varphi(\alpha+\theta)/\theta} - \varphi\right)/(\alpha+\theta-\varphi\theta) \qquad (27)$$

где $\alpha = t_в/\ell_к$; $\theta = K_р e_{нп}/\delta_о$; $\varphi = e_{нп} F_{нп}/K_{нп}$; $K_н, e_{нп}$, $F_{нп}$ -параметры регрессионной модели.

Оптимальные параметры станка и производственной системы

$$e_н^* = \delta_о/(K_р S_к^*); \quad N^* = (\ell_к/S_к + t_в)/480 \qquad (28)$$
$$F^* = [K_н/(e_н^* - e_{нп}) + F_{нп}]\, N^*$$

Модель оптимизации с учетом участков с сопряжениями

$$F = N \cdot F_н(e_н) \to min; \quad \delta_о = S_{к2} K_р e_н + K_э S_{к2} \qquad (29)$$
$$\delta_о = K_р e_н S_{к1}; \quad Q_о = 480N(\ell_{к1}/S_{к1} + \ell_{к2}/S_{к2} + t_в)$$

где $S_{к1}, S_{к2}$ - подача по контуру соответственно на плавных участках (длиной $\ell_{к1}$) и на участках контура с сопряжениями ($\ell_{к2}$).

Решение модели (29) приводится к решению квадратного уравнения относительно $S_{к1}$ ($\rho = \ell_{к2}/\ell_{к1}$; $\gamma = K_э/\delta_о$; $\alpha = t_в/\ell_{к1}$)

$$[\alpha + \gamma\rho + (1+\rho)(1-\varphi)\theta] S_к^2 + 2\varphi(1+\rho) S_{к1} - \varphi(1+\rho)/\theta = 0 \qquad (30)$$

В общем случае когда заданы регрессионные модели несущей системы станка $F_н(e_н)$, системы управления и системы вспомогательных механизмов $F_c, F_в$ модель оптимизации производственной системы

$$F = [F_н(e_н) + F_c(K_э) + F_в(t_в)]N \to min;$$
$$\delta_о = S_{к1} K_р e_н; \quad \delta_о = S_{к2} K_р e_н + K_в \cdot S_{к2}; \qquad (31)$$
$$Q_о = 480N/(\ell_{к1}/S_{к1} + \ell_{к2}/S_{к2} + t_в)$$

Для решения модели оптимизации (31) в случае линейных регрессионных моделей подсистем разработана программа П2.21.

Программное обеспечение МДО включает общую (ОПО) и прикладную части (ППО). ОПО содержит программы решения линейных и нелинейных алгебраических уравнений; вычисления определителей матриц, включая и обратные; программы регрессионного анализа, в том числе и функционалов качества. ППО содержит программы оптимизации как отдельных узлов, так и узлов в составе компоновок станков и станочных систем. Разработаны общие принципы построения системы автоматизации вариантного конструированияа (SAVAK). Предложен алгоритм экспресс-оптимизации в системе SAVAK на основе линейных регрессионных моделей функционалов качества при наличии минимальной информации по наборам вариантов конструкций узлов (предельные характеристики набора g_{ni}, F_{ni} и параметры одного варианта конструкции g_i, F_i). Тогда для сборки из n -узлов ($g_о$ - заданное качество сборки; $K_i = (F_i - F_{ni})(g_i - g_{ni})$)

$$A_о = \left(\frac{\sum_1^n \sqrt{K_i}}{g_о - \sum_1^n g_{ni}}\right)^2; \quad g_i^* = \sqrt{K_i/A_о} + g_{ni} \qquad (32)$$
$$F^* = \sum_1^n [K_i/(g_i^* - g_{ni}) + F_{ni}]$$

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В работе решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение, состоящая в повышении эффективности проектирования металлорежущих станков при заданных показателях точности и производительности за счет сокращения сроков проектирования, сокращения затрат трудовых и материальных ресурсов на производство и эксплуатацию этого оборудования на основе методологии двухуровневой оптимизации вариантного конструирования станков.

2. Разработанная методология двухуровневой оптимизации вариантного конструирования (МДО), закладывает основы для построения теории оптимального проектирования металлорежущих станков, поскольку на ее основе впервые решаются задачи оптимизации не только отдельных узлов, но и узлов в составе станка или станочной системы, то есть задачи многоуровневой оптимизации станочных конструкций.

Методология позволяет использовать прогрессивный принцип блочно-модульного проектирования станков и станочных систем, как при наличии унифицированных узлов и модулей, так и при их отсутствии, для чего формируются наборы узлов из оптимальных (расчетных) или допустимых (конструктивных) вариантов узлов.

3. С другой стороны МДО является дальнейшим развитием методов морфологического анализа и позволяет устранить наиболее узкое место этих методов, а именно: позволяет автоматизировать процедуру выбора конструкции станочных узлов из набора их вариантов даже на начальных этапах проектирования за счет описания наборов вариантов конструкций функционалами качества (функция качество-эффективность). Функционал качества станка имеет такой же вид и может быть построен в результате решения задачи оптимизации "сборки" станочных узлов.

4. В работе получены научные результаты, имеющие приоритетное значение для разработки подсистем САПР станков. Так построен алгоритм решения задачи назначения технических требований к отдельным станочным узлам, исходя из заданных требований по параметрам точности станка и заданной производительности станка или станочной системы в целом.

Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза станочных узлов, когда варьируются не только параметрические,

но и структурные переменные модели синтеза, что позволяет совместить процедуры структурного и параметрического синтеза.

5. Большинство моделей проектирования станочных узлов можно представить в виде задачи достижения заданного качества конструкции при минимизации критерия эффективности. Такая модель проектирования позволила сформировать целевую функцию задачи структурно-параметрической оптимизации вариантного конструирования станочных узлов как "функционал качества": гиперболическая зависимость функции качества от функции эффективности. Функционал качества обеспечивает инвариантность модели оптимизации от вида переменных. При использовании линейной регрессионной модели функционала качества набора вариантов конструкции его параметры являются показателями технико-экономического уровня этого набора.

6. Для структурно-параметрической оптимизации конструкции был разработан специальный метод: баланса градиентов (БГ-метод). Этот метод с одной стороны является ядром МДО, а с другой стороны имеет самостоятельное значение, как один из методов множителей Лагранжа. БГ-метод обеспечивает: структурно-параметрическую оптимизацию конструкций; оценку значимости переменных в модели оптимизации; получение аналитических зависимостей для определения оптимальных параметров конструкции; оценку направления оптимизации (для неавтоматизированных расчетов); оценку необходимости конструктивных изменений; формирование итерационнных зависимостей при многоуровневой оптимизации. На основе БГ-метода было получено ряд утверждений, имеющих принципиальное значение для МДО, основными из которых являются следующие: производные функционала качества по варьируемым переменным оптимальной конструкции или набора оптимальных вариантов конструкции равны между собой и меньше нуля; оптимизация по показателю качества не обеспечивает минимизации показателя эффективности.

7. Алгоритм двухуровневой оптимизации с учетом возможностей БГ-метода и принятой модели проектирования является последовательным применением восходящего и нисходящего проектирования. При восходящем проектировании решаются следующие задачи: декомпозиция станка или станочной системы (СтС) на отдельные узлы и подсистемы; формирование оптимального (БГ-методом) или расчетого набора вариантов конструкции (если отсутствует унифицированный набор конструкций узлов); описание наборов вариантов узлов регрессионными моделями функционалов качества; формирова-

ние модели оптимизации СтС, станка или подсистемы станка. При нисходящем проектировании решается задача оптимизации конструкции системы верхнего уровня (БГ-методом), расчет оптимальных параметров качества и эффективности станочных узлов (подсистем) и затем выбор их конструктивного исполнения из унифицированного ряда или определение этого исполнения на основе БГ-метода.

8. Для декомпозиции станочных систем предложено ввести понятия основных, распределенных и неизменяемых подсистем. Каждая основная подсистема является независимой относительно изменения параметров другой подсистемы. Параметры неизменяемых подсистем постоянны. Распределенная подсистема входит своими частями в состав моделей основных подсистем. Так для СтС основными подсистемами являются: подсистема основного оборудования, транспортная подсистема, подсистема складирования заготовок и деталей. Параметры распределенных подсистем: число координат системы управления, число обслуживающих рабочих, площадь занимаемая оборудованием и т. д.

9. Область применения МДО ограничена моделями, для которых функции качества и эффективности станка являются аддитивными относительно функций качества и эффективности узлов, то есть декомпозиция технологической машины или системы машин на отдельные узлы или подсистемы предполагает и декомпозицию ее функций качества и эффективности. Примером неаддитивной модели является трехпараметрическая модель автоматической линии.

Допущения при формировании модели оптимизации оборудования с помощью МДО в основном определяются условиями использования уравнений регрессии для аппроксимации функционалов качества узлов (наборов вариантов узлов) в виде гиперболических функций и использованием уравнений ограничений (функций качества) в виде равенств. Например, оптимизация с помощью МДО невозможна, если нельзя подобрать уравнение регрессии функционала качества для какого-либо набора вариантов конструкций, удовлетворяющее критерию Фишера. Из области использования МДО выпадает также класс задач, в которых ограничения задаются в виде неравенств.

10. Оптимизация вариантного конструирования станочной системы сводится к решению задачи обеспечения заданной производительности СтС при минимизации ее стоимости или приведенных затрат. В результате получаем оптимальное соотношение между экстенсивным и интенсивным способоми построения станочных систем, то

есть между числом единиц оборудования и уровнем их автоматизации. Получены оптимальные соотношения для параметров структуры автоматических линий. Для СтС, состоящей из одинаковых станков или станочных модулей доказано, что существует единственный оптимальный уровень производительности этих станков, не зависящий от заданной производительности станочной системы. Получены модели для расчета оптимального размера партии запуска и оптимального объема склада готовых деталей.

11. Метод баланса градиентов был использован при формировании наборов вариантов конструкции по жесткости узлов несущей системы станка как на основе унифицированных (шариковые винтовые передачи), так и оригинальных конструкций элементов (шпиндельные узлы, стойки). При этом получены оптимальные соотношения параметров для этих узлов при различных значениях их жесткости. Получены конкретные оценки значимости структурных и параметрических переменных в моделях проектирования этих узлов и оценки необходимости того или иного конструктивного изменения. Сравнивалась эффективность оптимизации БГ-методом и оптимизации на основе других моделей проектирования.

12. При оптимизации узлов в составе несущей системы станка заданной жесткости, решались задачи оптимизации узлов НС при их нагружении в одной плоскости и пространственном нагружении узлов. В первом случае задача оптимизации решается по обычному алгоритму МДО. В результате этого показано, что оптимальная жесткость узлов зависит от заданной жесткости НС станка. Во втором случае получаем смешанную задачу, включающую как двухуровневые (для ШВП и ШУ), так и одноуровневые задачи оптимизации (для стойки).

13. Проводились экспериментальные исследования динамической точности контурной импульсно-следящей системы ЧПУ вертикально-фрезерного станка. В результате экспериментальных исследований были отработаны элементы конструкции и структуры приводов подач станков с ЧПУ, на основе чего было получено ряд авторских свидетельств.

14. Была разработана модель оптимизации станочных узлов при заданной производительности станочной системы и заданой погрешности несущей системы станка и системы управления. В этом случае, кроме узлов НС и вспомогательных механизмов, оптимизируется также структура и конструкция системы ЧПУ станка, которые

определяют величину динамической погрешности на контуре детали. В состав системы ЧПУ включаются при этом приводы рабочих органов станка, а ее структура рассматривается как сочетание различных контуров управления. Разработан алгоритм формирования вариантов приводов подач станков с ЧПУ. На основе моделирования станочных систем управления получены их структурные варианты и алгоритмы коррекции, защищенные авторскими свидетельствами.

15. Для реализации МДО было разработано соответствующее программмно-методическое обеспечение, включающее программы формирования функционалов качества наборов вариантов конструкций (на основе метода наименьших квадратов) и решение систем нелинейных алгебраических уравнений. На базе МДО разработана среда SAVAK, которая обеспечивает на начальных этапах проектирования расчет оптимальных требований по качеству станочных узлов. При использовании линейных регрессионных моделей наборов узлов среда SAVAK позволяет производимть экспресс-анализ уровня качества узлов станка по отношению к оптимальному.

16. Методики и результаты исследований внедрены на заводах, СКБ, НИИ и в учебном процессе. Экономический эффект получен за счет сокращения трудовых и материальных затрат в том числе снижения металлоемкости станков на 10...15 % , снижение себестоимости узлов на 5...10 % , повышение производительности обработки на 10...20 % и сокращения сроков проектирования станков и станочных систем.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. Васильев Г. Н. Моделирование на АВМ систем прогаммного вления станков // Труды МВТУ. - 1976. - N 245 - Примен ни технических и аудиовизуальных средств в у' С. 93-100.
2. Исследование самообучающейся гидрофицирова вления фрезерного станка /М. М. Кузнецов, Г. Н. Васил Г. А. Светочев, М. М. Егоров // Известия вузов. Машинос роение. - 1976. - N 8. - С. 145-150.
3. Васильев Г. Н. Автоматизированое проектирование идросисте и гидроаппаратуры// Повышение ресурса и расширение функциональных задач гидравлческих и пневматических приводов, используемых при автоматизации производства и повышения качества

продукции: Тез. докл. Всесоюзн. науч. техн. совещ. - Запорожье, 1977. - С. 64-65.

4. Кузнецов М. М., Васильев Г. Н. Электрогидравлический усилитель мощности // Машины-приборы-стенды: Каталог МВТУ. - 1978. - N 6. - С. 17.
5. Васильев Г. Н. Автоматизированный расчет и моделирование механизмов и узлов металлорежущих станков // Труды МВТУ. -1978. - N 298 - Применение ЭВМ и ТСО в учебном процессе. С. 22-30.
6. Васильев Г. Н. Автоматизация исследования и проектирования станочного оборудования с ЧПУ // Тез. докл. У Всесоюзн. межвузовск. науч. техн. конф., посвящ. 150-летию МВТУ им. Н. Э. Баумана. Секц. "Автоматиз. произв. проц.". М. 1979. - С. 58-62.
7. Васильев Г. Н. Вопросы повышения эффективности и качества следящих приводов подач станков с ЧПУ на стадии проектных работ // Труды МВТУ. - 1980. - N 344 - Надежность и эффективность станков-автоматов. - С. 101-110.
8. Самообучающееся устройство управления станком / В. В. Додонов, Г. Н. Васильев, А. И. Крутов, А. К. Осипов // Машины-приборы-стенды: Каталог МВТУ. - 1980. - N 7. - С. 15.
9. Датчик частоты вращения / М. М. Кузнецов, Г. Н. Васильев, Ю. В. Никулин // Машины-приборы-стенды: Каталог МВТУ. - 1980. - N 7. - С. 16.
10. Васильев Г. Н. Структурно-компоновочный синтез механизмов и узлов металлорежущих станков //Современные пути повышения производительности и точности металлобрабатывающего оборудования и автоматизация технологических процессов в машиностроении (секц. "Автоматиз. произв. проц.") : Тез. докл. Всесоюзн. науч. техн. конф. - М. 1980. - С. 19-22.
11. Васильев Г. Н. Автоматизированные испытания металлорежущих станков и выбор методов идентификации // Надежность и качество машин (испытание, диагностика, прогнозирование) : Тез. докл. Всесоюзн. науч. техн. конф. - М., 1981. - Ч. II. - С. 51-52.
12. Проников А. С., Васильев Г. Н., Додонов В. В. Программы и алгоритмы для расчета и проектирования металлорежущих станков. Учебн. пособие. - М.: МВТУ, 1982. - 35 с.
13. Васильев Г. Н. Автоматизация проектирования станков и автоматических линий из унифицированных узлов //Труды МВТУ. - 1982. - N 379 - Методы исследования станков. - С. 75-79.

14. Васильев Г. Н. Структурно-параметрические модели при автоматизации проектирования станочных гидросистем //Совершенствование гидро- и пневмоагрегатов в машиностроении: Тез. докл. Всесоюзн. науч. техн. конф. - М., 1985. - С. 18-20.
15. Васильев Г. Н. Расчет динамических параметров приводов подач рабочих органов станков с ЧПУ //Учебн. пособ. для студентов вечерников /Под ред. А. С. Проникова. -М.: МВТУ, 1985. - С. 48-60.
16. Системы автоматизированного проектирования. Уч. пособие для техн. вузов в 9-ти кн. /Под редакцией И. П. Норенкова. - М.: Высшая школа. - Кн. 6. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования. /Н. М. Капустин, Г. Н. Васильев. - 1986. - 191 с.
17. Васильев Г. Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков. -М.: Машиностроение. 1987. -280 с.
18. Васильев Г. Н. Автоматизированное оптимальное проектирование шпиндельных узлов // В учебн. пособии для курсового и дипломного проектирования. - М.: МВТУ, 1987. - С. 25-34.
19. Васильев Г. Н. Оптимальное проектирование станочных систем. //Известия вузов. Машиностроение. - 1987. - N 10. - С. 142-153.
20. Васильев Г. Н. Автоматизированное проектирование компоновок станочных модулей и ГПС //Автоматическое манипулирование объектами и технологическая оснастка в станках с ЧПУ и ГПС: тез. докл. Всесоюзн. науч. техн. конф. - Киев, 1988. - С. 35-37.
21. Системы автоматизированного проектирования. Уч. пособие для техн. вузов в 9-ти кн. /Под редакцией И. П. Норенкова. - Минск: Вышэйшая школа. - Кн. 6. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования. /Н. М. Капустин, Г. Н. Васильев. - 1988. - 191 с.
22. Васильев Г. Н. Автоматизация компоновочного проектирования станков и станочных систем. //Опыт разработки и внедрения САПР в машиностроении: Материалы Всесоюзн. науч. практич. семин. - Тольятти, 1989. - С. 3-6.
23. Васильев Г. Н. Копалеишвили Л. М. Оптимизация компоновки гибкого производственного модуля с учетом комплектной поставки деталей на сборку. //Опыт разработки и внедрения САПР в машиностроении: Материалы Всесоюзн. науч. практич. семин. - Тольятти, 1989. - С. 7-8.
24. Васильев Г. Н. Компоновочное проектирование станков и станочных систем. М., 1989 - 60 с. (Машиностроительное производ-

ство. Сер. Автоматизированные системы проектирования и управления. Обзорная информация. ВНИИТЭМР, вып. 4).

25. Васильев Г. Н., Копалеишвили Л. М. Расчет времени переналадки гибкого производственного модуля с учетом оптимальной последовательности обработки деталей // Известия вузов. Машиностроение. - 1989. - N 8. - С. 115-119.
26. Васильев Г. Н. Обеспечение качества и эффективности станочных конструкций методами двухуровневой оптимизации //Отраслевая наука производству: Материалы Всесоюзн. семинара. - М., 1991. - С. 129-134.
27. Васильев Г. Н. Методология структурно-параметрической оптимизации технического уровня производственных систем на базе регрессионных моделей проектирования. /Вестник МГТУ. Машиностроение. -1993. - N 4. - С. 123-133.
28. А. С. 362948 (СССР). Гидравлический усилитель мощности /М. М. Кузнецов, А. К. Асламазян, Г. Н. Васильев// Б. И. - 1973. -N 3.
29. А. С. 379778 (СССР). Устройство для установки нулевого положения двухкаскадного электрогидравлического усилителя /М. М. Кузнецов, А. К. Асламазян, Г. Н. Васильев//Б. И. -1973. - N 20.
30. А. С. 392278 (СССР). Электрогидравлический усилитель /М. М. Кузнецов, А. К. Асламазян, Г. Н. Васильев //Б. И. - 1973. - N 32.
31. А. С. 430239 (СССР). Гидравлический усилитель /М. М. Кузнецов, А. К. Асламазян, Г. Н. Васильев //Б. И. - 1974. - N 20.
32. А. С. 448312 (СССР). Гидропривод /М. М. Кузнецов, А. К. Асламазян, Г. Н. Васильев // Б. И. - 1974. - N 40.
33. А. С. 525723 (СССР). Электрогидравлический усилитель /М. М. Кузнецов, В. В. Додонов, Г. Н. Васильев //Б. И. - 1976. - N 32.
34. А. С. 602917 (СССР). Шаговая система экстремального управления /М. М. Кузнецов, А. Г. Осипов, В. В. Додонов, Г. Н. Васильев А. И. Крутов, Е. И. Николенко // Б. И. - 1978. - N 14.
35. А. С. 708309 (СССР). Устройство для программного управления станком /В. В. Додонов, А. К. Осипов, А. И. Крутов, Г. Н. Васильев // Б. И. - 1980. - N 1.
36. А. С. 735832 (СССР). Самоподнастраивающийся линейный шаговый электрогидравлический привод /М. М. Кузнецов, В. В. Додонов, В. К. Москвин, Г. Н. Васильев // Б. И. - 1980. - N 19.