

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.91

**Р. Г. КУДОЯРОВ, Е. М. ДУРКО, В. К. ЗАЛЬЦБЕРГ,  
А. В. ЮСУПОВА, Р. Р. БАШАРОВ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО  
СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ  
УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Рассмотрены особенности проектирования мехатронного станочного оборудования для реализации управляемых технологических процессов, изложены вопросы определения алгоритмов переходов обработки, структуры модулей, особенности разработки кинематической схемы и конструкции модулей. *Мехатронный станок; модуль; адаптация работы станка; функциональные подсистемы; структура и динамические характеристики мехатронного модуля*

**ВВЕДЕНИЕ**

Повышение технологических возможностей металлообрабатывающих станков с автоматическим управлением связано с необходимостью совершенствования их конструкции. Большое значение отводится вопросам рационального построения модулей, которые должны обеспечивать осуществление исполнительных движений с необходимыми параметрами пространства и времени. Актуальной становится задача реализации управляемых исполнительных движений с адаптацией к изменяющимся условиям обработки деталей.

Рациональная структура модуля станка может быть построена на основе использования результатов оптимизации процесса резания, особенно труднообрабатываемых сталей и сплавов, а также исследований точности, жесткости и динамики станков [1]. Необходимо формирование на этой основе алгоритмов выполнения переходов обработки и управления оборудованием при изготовлении деталей, которые должны учитываться при проектировании модулей. В ряде случаев, особенно при высокоскоростной обработке, целесообразно использование модулей со встроенными двигателями в виде электрошпинделей.

При силовом резании обеспечение необходимого диапазона регулирования частот вращения шпинделя с постоянной мощностью требует наряду с регулируемыми электродвигателями

применения переборных коробок передач с автоматическим управлением. В связи с этим необходима разработка модулей с учетом их динамических характеристик для обеспечения повышенной управляемости работой станка при изготовлении деталей.

**1. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАТРОННЫХ  
СТАНКОВ**

Ниже приведены результаты известных исследований в области оптимизации процесса обработки и динамики станков, на основе которых могут разрабатываться структуры модулей проектируемого мехатронного станочного оборудования:

1) Для процессов резания различных материалов инструментами из быстрорежущих сталей и твердых сплавов зависимость стойкости инструмента от скорости резания носит экстремальный или монотонно убывающий характер [2]. Скорость резания, соответствующая наибольшему периоду стойкости инструмента, обозначается  $V_m$ . Зависимость длины пути резания от скорости носит экстремальный характер. Скорость, которой соответствует наибольшая длина пути резания, называется оптимальной скоростью резания и обозначается  $V_o$ . При повышении режущих свойств инструментальных материалов наблюдается повышение оптимальных скоростей резания. Всегда справедливо неравенство  $V_m < V_o$ , поэтому работа на скорости  $V_m$  по сравнению со скоростью  $V_o$  является нерациональной, так как это приводит к сниже-

нию производительности обработки размерной стойкости инструмента и ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

Оптимальным скоростям резания для заданного материала режущей части инструмента при различных комбинациях скорости резания, подачи, глубины и геометрии инструмента соответствует постоянная температура в зоне резания, которая является оптимальной [2].

При известных значениях оптимальной и текущей температур резания можно за счет изменения скорости резания или подачи добиться осуществления обработки наибольшего количество деталей при минимальном износе инструмента.

С учетом этого можно сформулировать алгоритм выполнения перехода обработки: изменение частоты вращения шпинделя в процессе резания с учетом температуры резания для обеспечения оптимальной скорости  $V_o$ , при которой достигается минимальный износ режущей части инструмента и наибольшая точность детали.

2) Экономический период стойкости  $T_3$ , соответствующий минимуму себестоимости операции  $A$ , определяется по формуле (2)

$$T_3 = \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \cdot \left( t_{cm} + \frac{e}{E} \right), \quad (1)$$

где  $E$  – стоимость станко-минуты, руб.;  $t_{cm}$  – время на смену затупившегося инструмента и его подналадку за период стойкости, мин;  $e$  – стоимость эксплуатации инструмента за период стойкости, руб.;  $m$  – коэффициент, характеризующий зависимость стойкости инструмента от скорости резания.

Период стойкости  $T_{мп}$ , соответствующий максимальной производительности труда на данном рабочем месте, определяется по формуле

$$T_{мп} = \left( \frac{1-m}{m} \right) \cdot t_{cm}. \quad (2)$$

Данным значениям периода стойкости инструмента  $T_3$  и  $T_{мп}$  соответствуют значения скоростей резания  $V_3$  и  $V_{мп}$ , при которых достигается минимальная себестоимость и максимальная производительность соответственно

$$V_3 = \frac{C_v}{T_3^m}, \quad (3)$$

$$V_{мп} = \frac{C_v}{T_{мп}^m}, \quad (4)$$

где  $C_v$  – постоянная величина, зависящая от обрабатываемого и инструментального материа-

лов, глубины резания, подачи и прочих условий;  $m$  – показатель относительной стойкости.

Так как  $T_{мп} < T_3$ , то скорость резания  $V_{мп}$ , при которой достигается максимальная производительность труда на данном рабочем месте, выше экономической скорости резания.

Из вышеописанного можно сформулировать алгоритм выполнения перехода обработки: изменение частоты вращения шпинделя в процессе резания с учетом температуры резания для обеспечения процесса резания на скорости  $V_{мп}$ , при которой с учетом предъявляемых требований достигается максимальная производительность, или на скорости  $V_3$ , при которой достигается минимальная себестоимость.

3) В результате исследований, выполненных на кафедре мехатронных станочных систем УГАТУ, установлено, что управление ускорением и торможением движения подачи с учетом действующих инерционных сил позволяет повысить производительность и точность обработки.

С учетом этого целесообразно осуществление алгоритмов переходов: изменение ускорения и торможения движения подачи с учетом действующих сил для обеспечения минимального времени разгона и торможения с целью обеспечения повышенной производительности; изменение ускорения и торможения движения подачи с учетом действующих сил для обеспечения точной остановки инструмента и достижения повышенной точности обработки.

4) С учетом технологических возможностей станка в отношении точности обработки, допускаемых нагрузок и определенных условий нормального протекания процесса на переменные состояния и управляющие параметры станка накладываются ограничения. В системах предельного управления, предназначенных для управления черновой и получистовой обработкой, когда стремятся к максимальному использованию мощности, ограничения относятся к силовым параметрам, а в случае управления чистовой и получистовой обработкой ограничения устанавливаются на управляющие параметры, главным образом, на подачу [1]. На основании этого возможны алгоритмы переходов обработки: изменение подачи в процессе резания с учетом обеспечения постоянства тяговой силы для обеспечения минимальной себестоимости за счет предотвращения повышенного износа инструмента или его поломки; изменение подачи в процессе резания с учетом обеспечения постоянной тяговой силы для обеспечения повышен-

ной стойкости инструмента и точности обработки.

4) Шероховатость обработанной поверхности зависит от уровня и частотного спектра вибраций между инструментом и заготовкой [1].

При достаточной жесткости несущей системы станка низкочастотные вибрации можно устранить понижением или повышением скорости резания, в результате чего изменяется фаза колебаний и динамическая система переходит в устойчивую зону работы. Во многих случаях изменение скорости резания оказывается одним из простых и эффективных способов устранения вибраций [3], однако это может привести к нарушению оптимальной скорости резания, наростообразованию или возникновению высокочастотных колебаний инструмента. Изменение подачи в процессе обработки может выражаться в повышении или понижении виброустойчивости станка. Объясняется это спецификой совокупного влияния скорости, свойств обрабатываемого материала и геометрии срезаемого слоя на характеристику процесса резания [3].

Из вышеописанного получаем следующий алгоритм выполнения переходов обработки: изменение частоты вращения шпинделя и подач в процессе резания с учетом колебаний несущей системы для исключения резонансных колебаний и достижения наименьшей шероховатости поверхности детали.

Реализация приведенных алгоритмов обработки требует применения функциональных подсистем изменения скорости (ускорения и торможения) исполнительных органов модулей с учетом физических параметров для обеспечения необходимых показателей обработки. Это обуславливает выбор определенных датчиков, информационных и управляющих связей.

## 2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МЕХАТРОННОГО СТАНКА

Исходя из назначения мехатронного станочного оборудования в соответствии с функциями, необходимыми при автоматизированной обработке деталей, установлены признаки функциональных подсистем и их состав [4]. В табл. 1 приведен сводный состав функциональных подсистем различных уровней, которые может иметь мехатронное станочное оборудование. Необходимый состав подсистем определяется назначением оборудования и требованиями, предъявляемыми к изготавливаемым деталям и конкретному производству.

Станочные модули в зависимости от назначения могут быть подразделены на основные,

вспомогательные и специальные. Основные модули являются формообразующими, то есть позволяют с помощью набора подсистем обеспечить получение детали требуемого качества. Они подразделяются на модули главного движения и модули подачи, которые могут быть простыми или комбинированными.

Комбинированный модуль представляет собой конструктивное сочетание двух или нескольких простых модулей с возможностью согласования соответствующих подсистем управления для получения сложных исполнительных движений.

Основные модули в станках с автоматическим управлением также могут обеспечивать выполнение движений деления, врезания. Специальные модули относятся к формообразующим, если они предназначены для обеспечения требуемых показателей оборудования с учетом особенностей конструкции и условий работы. В основном их функции сводятся к обеспечению корректирующих вращательных или поступательных микроперемещений. Вспомогательные модули предназначены для осуществления исполнительных движений, обслуживающих процесс обработки детали.

К исходным данным при разработке структуры проектируемого модуля относятся:

- 1) тип проектируемого станка и его основное назначение;
  - 2) сведения о выполняемых переходах обработки;
  - 3) требования к проектируемому оборудованию в отношении обеспечения эффективности его применения.
- Рациональная последовательность разработки структуры модуля станка включает этапы, к которым относятся [4]:
- 1) анализ схем обработки деталей;
  - 2) определение алгоритмов выполнения переходов обработки;
  - 3) определение состава модулей и функциональных подсистем модуля;
  - 4) разработка блок-схемы;
  - 5) разработка структуры модуля.

При проведении анализа схем обработки следует определить метод формообразования детали и состав исполнительных движений. Для осуществления этих схем обработки определяется необходимый состав модулей (на начальном этапе может производиться с учетом станка-аналога). Далее устанавливаются алгоритмы выполнения переходов, рассмотренные выше.

Таблица 1

Состав функциональных подсистем станочного оборудования с автоматическим управлением

Подсистемы 1-го уровня, реализующие виды исполнительных движений	Подсистемы 2-го уровня, обеспечивающие параметры исполнительных движений	Подсистемы 3-го уровня, обеспечивающие особенности реализации параметров исполнительных движений	Подсистемы 4-го уровня, реализующие виды действий при управлении исполнительными движениями
Мехатронные модули основные, простые и комбинированные, специальные	Подсистемы мехатронных модулей обеспечения пуска и остановки движения, реверсирования, скорости, перемещения и траектории	Подсистемы обеспечения особенностей пуска и остановки движения, реверсирования, скорости, перемещения и траектории	Подсистемы обеспечения видов действий управления при реализации особенностей параметров исполнительных движений – по программе и в режимах самонастраивания

Для реализации рассматриваемых переходов обработки определяются необходимые функциональные подсистемы. Они указываются в табличном виде с учетом классификации и системы обозначений [4]. Состав функциональных подсистем позволяет определить перечень датчиков и необходимые структурные связи. На основании этих данных производится разработка блок-схемы и структуры проектируемого модуля.

К последующим этапам относится разработка кинематической схемы и конструкции модуля. Сравнение разработанного варианта модуля с соответствующим модулем станка-аналога может производиться на основе моделирования и оценки показателей их работы.

### 3. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРИВОДА МОДУЛЯ С БЕССТУПЕНЧАТЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Разработка кинематической схемы привода модуля главного движения выполняется на основе его структуры, составленной с учетом требуемых функциональных подсистем, выбранных технических характеристик и принятой компоновки. В частности, наличие подсистемы изменения скорости в процессе обработки обуславливает необходимость разработки автоматического привода модуля с бесступенчатым регулированием частот вращения шпинделя. Такие приводы необходимы для обеспечения повышенных технологических возможностей мехатронных станков.

Приводы с бесступенчатым регулированием в распространенных станках с ЧПУ содержат регулируемые электродвигатели и переборные коробки [1]. В качестве электродвигателя применяются электродвигатели постоянного тока

или асинхронные с частотным регулированием. В приводах главного движения многоцелевых станков при выборе электродвигателя предпочтение отдается асинхронным двигателям с частотным регулированием, так как они обладают более жесткими характеристиками и меньшими габаритами.

При разработке кинематической схемы привода главного движения модуля с бесступенчатым регулированием частот вращения шпинделя [1] необходимо предварительно определить параметры переборной коробки – знаменатель регулирования  $\varphi_{пк}$  и количество ступеней частот вращения  $z_{пк}$ , а также уточнить используемые наибольшую и наименьшую частоты вращения вала электродвигателя.

Следует отметить, что с целью уменьшения количества ступеней переборной коробки целесообразно применение электродвигателя с увеличенным диапазоном регулирования  $R_{Эр}$ . В ряде случаев это может достигаться за счет выбора электродвигателя с повышенной мощностью. Для такого двигателя при определенной номинальной частоте вращения соответственно коэффициенту повышения мощности увеличивается диапазон регулирования  $R_{Эр}$ .

В связи с тем, что повышение мощности электродвигателя может отразиться на увеличении стоимости модуля, выбор варианта привода должен сопровождаться технико-экономическим обоснованием.

### 4. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА

Выполнение данного этапа может осуществляться на стадиях предварительного проектирования и уточнения конструкции. При этом составляется динамическая модель привода в виде системы с сосредоточенными массами, со-

единенными между собой упругими и демпфирующими связями [3].

Для анализа показателей модуля рекомендуется целесообразно использовать методику имитационного моделирования, которая предусматривает определение физического взаимодействия звеньев модели, построение графа связей, структурной модели и определение общей передаточной функции модели.

Для анализа передаточных функций частей модели и общей передаточной функции целесообразно применение программы визуального моделирования Simulink, входящей в состав пакета MATLAB. Эта программа позволяет осуществлять в автоматическом режиме построение графиков, характеризующих переходные процессы модели и ее отдельных частей. При этом появляется возможность сравнения отдельных вариантов конструкции привода по динамическим характеристикам.

При корректировке конструкции модуля, проведенной с учетом проверочных расчетов, целесообразно уточнение показателей переходного процесса. Также может предусматриваться построение амплитудно-фазово-частотной характеристики и определение виброустойчивости привода [3].

Ниже рассмотрено моделирование вариантов привода модуля с бесступенчатым регулированием частот вращения шпинделя в пределах 110–3000 об/мин с регулируемым электродвигателем.

**Привод модуля с переборной коробкой**

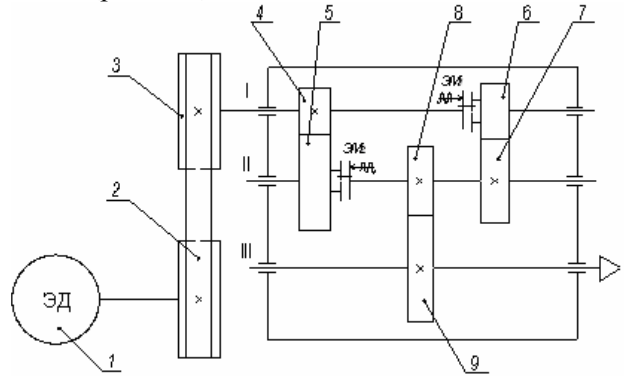
В качестве данного варианта принят вариант привода с нормальной множительной структурой  $1 \cdot 2_{11} \cdot 1 = 2$ .

На рис. 1, 2 показаны принципиальная кинематическая схема привода и график частот вращения валов данного привода.

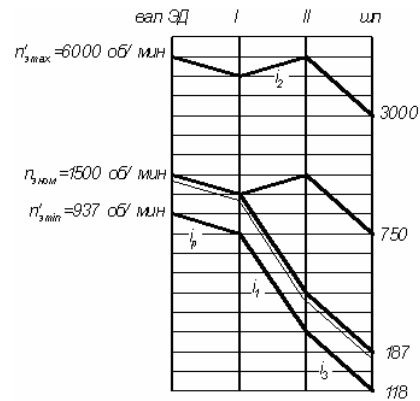
На рис. 3 приведена модель привода с автоматической переборной коробкой. Приняты следующие обозначения:  $\omega_d, M_d$  – частота вращения и момент на вале электродвигателя,  $M_{yi}, M_{di}, M_{di}$  – моменты упругих, инерционных и диссипативных сил,  $k_b, h_{i i}$  – коэффициенты жесткости и демпфирования и угловая частота вращения деталей привода

При анализе динамических показателей привода учитывались конструктивные особенности данного привода; в качестве сосредоточенных масс приняты ротор двигателя, оба шкива, переборная коробка (рис. 3, а). На основе построенного графа связей (рис. 3, б) определены передаточные функции элементарных

звеньев (табл. 2) и разработана структурная схема (рис. 3, в).



**Рис. 1.** Кинематическая схема привода модуля главного движения с автоматической переборной коробкой передач

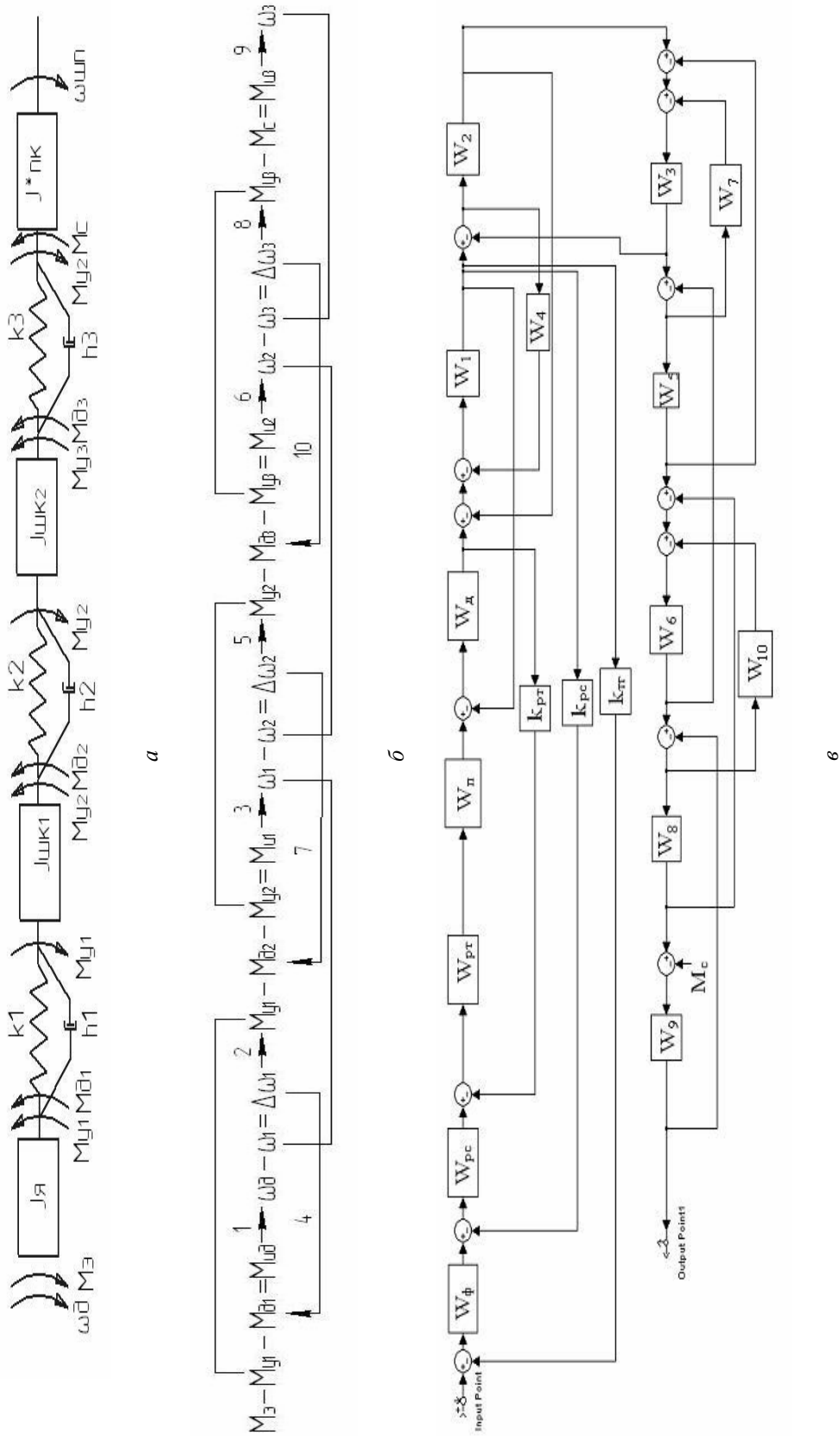


**Рис. 2.** График частот вращения валов привода

Таблица 2

Передаточные функции элементарных звеньев

Физические зависимости	Передаточные функции
$M_{ид} = J_d \omega_d p$	$W_1 = \frac{\omega_d}{M_{ид}} = \frac{\omega_d}{J_d \omega_d p} = \frac{1}{J_d p}$
$M_{y1} = k_1 \Delta \phi_1$	$W_2 = \frac{M_{y1}}{\Delta \omega_1} = \frac{k_1 \Delta \phi_1}{\Delta \phi_1 p} = \frac{k_1}{p}$
$M_{и1} = J_{шк1} \omega_1 p$	$W_3 = \frac{\omega_1}{M_{и1}} = \frac{\omega_1}{J_{шк1} \omega_1 p} = \frac{1}{J_{шк1} p}$
$M_{д1} = h_1 \Delta \omega_1$	$W_4 = \frac{M_{д1}}{\Delta \omega_1} = \frac{h_1 \Delta \omega_1}{\Delta \omega_1} = h_1$
$M_{y2} = k_2 \Delta \phi_2$	$W_5 = \frac{M_{y2}}{\Delta \omega_2} = \frac{k_2 \Delta \phi_2}{\Delta \phi_2 p} = \frac{k_2}{p}$
$M_{и2} = J_{шк2} \omega_2 p$	$W_6 = \frac{\omega_2}{M_{и2}} = \frac{\omega_2}{J_{шк2} \omega_2 p} = \frac{1}{J_{шк2} p}$
$M_{д2} = h_2 \Delta \omega_2$	$W_7 = \frac{M_{д2}}{\Delta \omega_2} = \frac{h_2 \Delta \omega_2}{\Delta \omega_2} = h_2$
$M_{y3} = k_3 \Delta \phi_3$	$W_8 = \frac{M_{y3}}{\Delta \omega_3} = \frac{k_3 \Delta \phi_3}{\Delta \phi_3 p} = \frac{k_3}{p}$
$M_{и3} = J_{шк3} \omega_3 p$	$W_9 = \frac{\omega_3}{M_{и3}} = \frac{\omega_3}{J_{шк3} \omega_3 p} = \frac{1}{J_{шк3} p}$



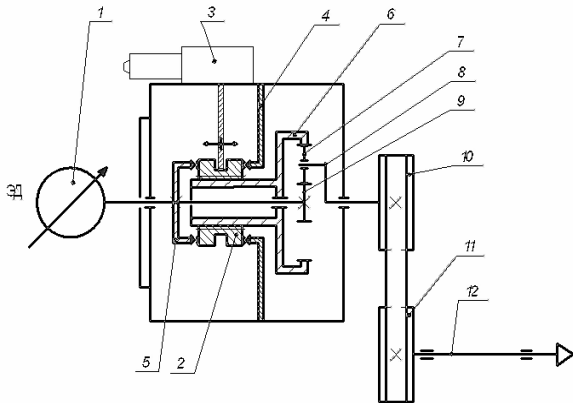
**Рис. 3.** Модель привода с автоматической переборной коробкой:  
*а* – функциональная схема, *б* – граф связей, *в* – структурная схема

Анализ передаточных функций проведен с помощью программы визуального моделирования Simulink, входящей в состав пакета MATLAB. График переходного процесса динамической модели представлен на рис. 7.

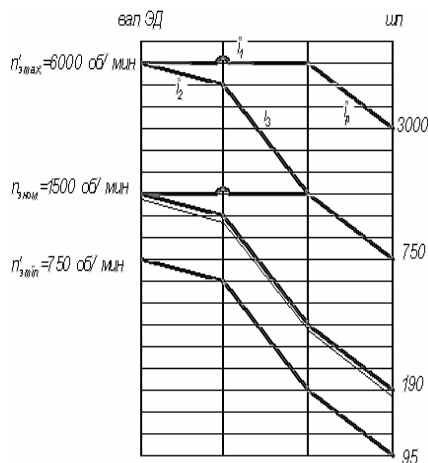
**Привод модуля с планетарным редуктором**

Для данного варианта привода главного движения выбран вариант со сложной структурой  $(1 + 1_B) \cdot 1 = 2$ , где индекс «в» означает, что передача движения происходит с участием водила. Привод такого типа предусматривает применение двухскоростного планетарного редуктора.

В приводе главного движения данного вида возможно применение планетарного двухступенчатого редуктора по типу, выпускаемому немецкой фирмой ZF. На рис. 4, 5 показаны принципиальная кинематическая схема привода модуля и график частот вращения валов. Сведения о модели, разработанной на основе конструкции привода, представлены на рис. 6 и в табл. 3.



**Рис. 4.** Принципиальная кинематическая схема привода модуля главного движения с автоматическим 2-х скоростным планетарным редуктором



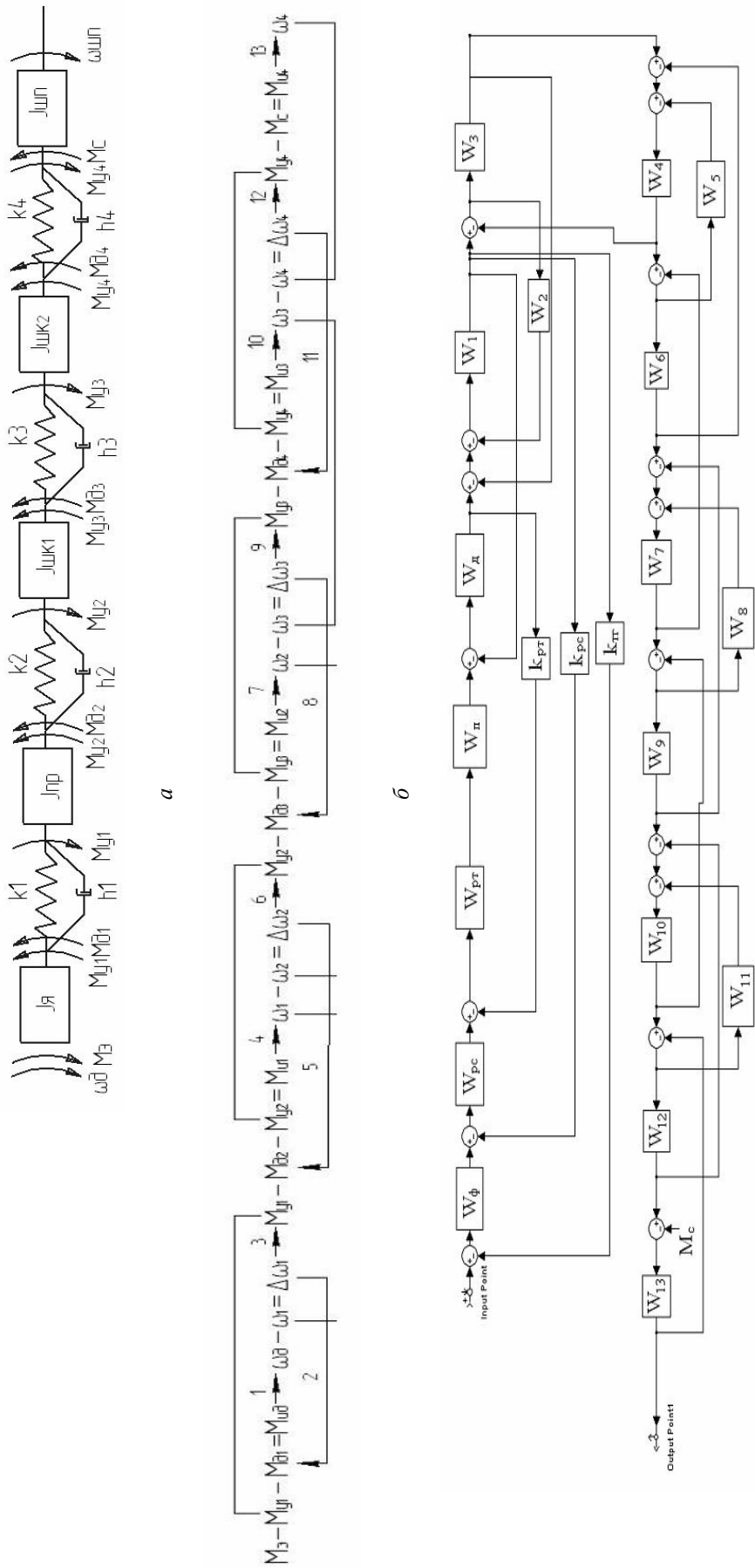
**Рис. 5.** График частот вращения валов привода

График переходного процесса для данного варианта привода приведен на рис. 7.

Таблица 3

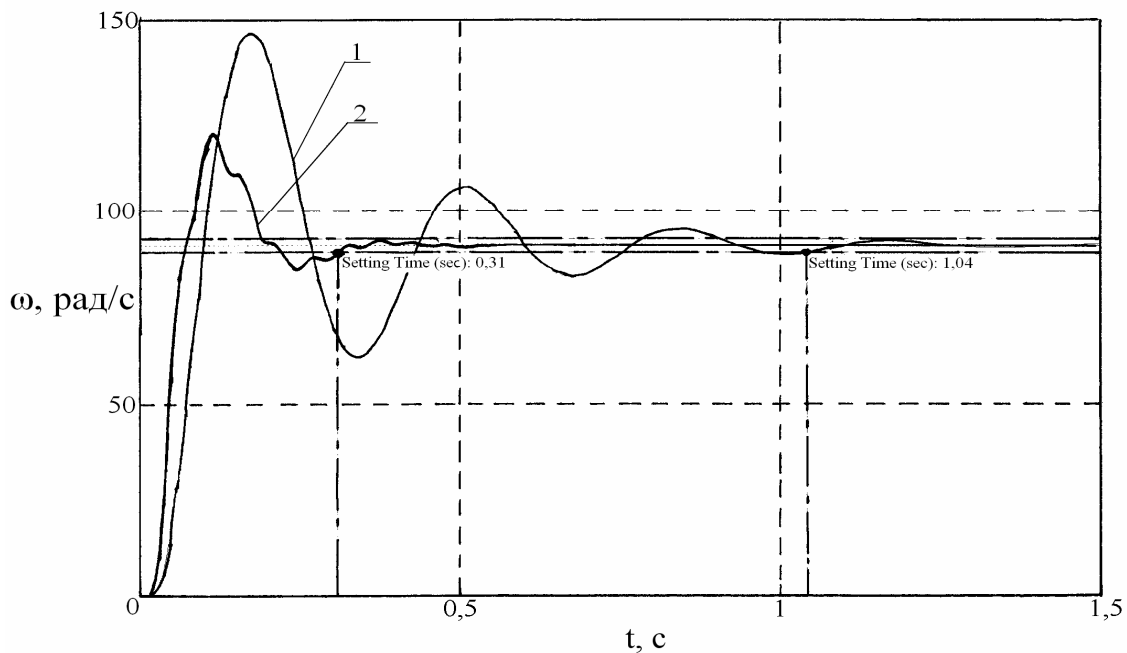
Передаточные функции элементарных звеньев	
Физические зависимости	Передаточные функции
$M_{нд} = J_d \omega_d p$	$W_1 = \frac{\omega_d}{M_{нд}} = \frac{\omega_d}{J_d \omega_d p} = \frac{1}{J_d p}$
$M_{д1} = h_1 \Delta \omega_1$	$W_2 = \frac{M_{д1}}{\Delta \omega_1} = \frac{h_1 \Delta \omega_1}{\Delta \omega_1} = h_1$
$M_{y1} = k_1 \Delta \varphi_1$	$W_3 = \frac{M_{y1}}{\Delta \omega_1} = \frac{k_1 \Delta \varphi_1}{\Delta \varphi_1 p} = \frac{k_1}{p}$
$M_{н1} = J_{шк1} \omega_1 p$	$W_4 = \frac{\omega_1}{M_{н1}} = \frac{\omega_1}{J_{шк1} \omega_1 p} = \frac{1}{J_{шк1} p}$
$M_{д2} = h_2 \Delta \omega_2$	$W_5 = \frac{M_{д2}}{\Delta \omega_2} = \frac{h_2 \Delta \omega_2}{\Delta \omega_2} = h_2$
$M_{y2} = k_2 \Delta \varphi_2$	$W_6 = \frac{M_{y2}}{\Delta \omega_2} = \frac{k_2 \Delta \varphi_2}{\Delta \varphi_2 p} = \frac{k_2}{p}$
$M_{н2} = J_{шк2} \omega_2 p$	$W_7 = \frac{\omega_2}{M_{н2}} = \frac{\omega_2}{J_{шк2} \omega_2 p} = \frac{1}{J_{шк2} p}$
$M_{д3} = h_3 \Delta \omega_3$	$W_8 = \frac{M_{д3}}{\Delta \omega_3} = \frac{h_3 \Delta \omega_3}{\Delta \omega_3} = h_3$
$M_{y3} = k_3 \Delta \varphi_3$	$W_9 = \frac{M_{y3}}{\Delta \omega_3} = \frac{k_3 \Delta \varphi_3}{\Delta \varphi_3 p} = \frac{k_3}{p}$
$M_{н3} = J_{шк3} \omega_3 p$	$W_{10} = \frac{\omega_3}{M_{н3}} = \frac{\omega_3}{J_{шк3} \omega_3 p} = \frac{1}{J_{шк3} p}$
$M_{д4} = h_4 \Delta \omega_4$	$W_{11} = \frac{M_{д4}}{\Delta \omega_4} = \frac{h_4 \Delta \omega_4}{\Delta \omega_4} = h_4$
$M_{y4} = k_4 \Delta \varphi_4$	$W_{12} = \frac{M_{y4}}{\Delta \omega_4} = \frac{k_4 \Delta \varphi_4}{\Delta \varphi_4 p} = \frac{k_4}{p}$
$M_{н4} = J_{шп} \omega_4 p$	$W_{13} = \frac{\omega_4}{M_{н4}} = \frac{\omega_4}{J_{шп} \omega_4 p} = \frac{1}{J_{шп} p}$

Сравнивая полученные графики, можно сделать вывод, что вариант привода с переборной коробкой значительно уступает по своим характеристикам варианту с планетарным редуктором. Переходный процесс первого варианта привода увеличен ( $t = 1,04$  с) и характеризуется большей амплитудой колебаний процесса. Это объясняется наличием в приводе переборной коробки, имеющей относительно большой момент инерции ( $J_{шк}^* = 0,0632$  кг/м<sup>2</sup>). Вариант привода с планетарным редуктором имеет меньшее в 3 раза время переходного процесса ( $t = 0,309$  с), при этом колебательность системы уменьшена, но сохраняется. Это обусловлено также наличием в приводе ременной передачи, имеющей значительные габариты.



**Рис. 6.** Модель привода с планетарным редуктором:  
 а – функциональная схема, б – граф связей, в – структурная схема





**Рис. 7.** Переходные процессы динамических моделей приводов модулей:  
1 – с переборной коробкой; 2 – с планетарным редуктором

Кроме того, к преимуществам планетарного редуктора можно отнести его компактность и меньшую массу по сравнению с переборной коробкой. В данном случае мощность передается по нескольким потокам, число которых равно числу сателлитов, при этом нагрузка на зубья в каждом зацеплении уменьшается. При соблюдении условия симметричного расположения сателлитов силы в зубчатых зацеплениях уравниваются и не нагружают валы и опоры.

На основании этого можно заключить, что для дальнейшего проектирования модуля с управляемым главным движением в данном случае целесообразно принять вариант привода с планетарным редуктором.

В настоящее время существенно возрастает спрос на станки с автоматическим управлением с возможностью реализации высокоскоростной обработки. Такие станки имеют мехатронные модули движения, к числу которых относятся электрошпиндели.

Современный электрошпиндель представляет собой регулируемый электродвигатель, ротором которого является шпиндель; он оснащается системой охлаждения, устройством зажима инструмента или обрабатываемой детали и выполняется с регулируемыми опорами, в качестве которых распространены подшипники качения. На Стерлитамакском станкозаводе применяются электрошпиндели мо-

делей LC100 и DMS100 с наибольшей частотой вращения 12000 об/мин.

Фирма Franz Kessler разработала гамму электрошпинделей с электромагнитными опорами, имеющими устройство внешней автоматической стабилизации и обеспечивающими высокую частоту вращения, большую удельную мощность, статическую и динамическую жесткость. При номинальной мощности 30 кВт эти электрошпиндели обеспечивают частоту вращения до 90000 об/мин.; при номинальной мощности 10 кВт они развивают частоту вращения до 120000 об/мин.

Электрошпиндели характеризуются относительно невысоким диапазоном регулирования частот вращения с постоянной мощностью  $R_{np} = 2,5$  и при некотором спаде мощности  $R_{np} = 4$ , что определяет специализированное назначение станочного оборудования – для осуществления высокоскоростной обработки с небольшим диапазоном изменения частот вращения шпинделя.

Повышение частот вращения шпиндельного узла увеличивает динамические нагрузки на опоры шпинделя и упругую систему станка. При этом увеличиваются требования по жесткости и динамической устойчивости электрошпинделя, которые зависят от множества факторов, таких как тип применяемого подшипника, расстояние между передними и задними подшипниками, частота вращения, обрабаты-

ваемый материал, тип и геометрия инструмента, крепление инструмента и т. д.

### ВЫВОДЫ

1. При разработке мехатронного станочного оборудования целесообразно предварительное определение алгоритмов выполнения переходов обработки управляемого технологического процесса, которые могут устанавливаться на основании результатов в области оптимизации процесса резания и исследований точности, жесткости и динамики станков.

2. Разработке кинематической схемы и конструкции модулей станка должно предшествовать составление структуры с определением необходимых функциональных подсистем с учетом выбранных алгоритмов выполнения переходов обработки.

3. Выбор рациональных вариантов конструкции модулей станка целесообразно производить с учетом обеспечения повышенных характеристик работы, установленных на основании моделирования динамических процессов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Станочное** оборудование автоматизированного производства / Под ред. В.В. Бушуева, Т. 1, 2. М.: Изд-во «Станкин», 1993. 584 с.; 1994. 653 с.

2. **Кишуров, В. М.** Резание металлов. Режущий инструмент: Учеб. пособие / В. М. Кишуров, В. В. Постнов, П. П. Черников. М.: Изд-во МАИ, 2005. 445 с.

3. **Дурко, Е. М.** Динамика станков: Учеб. пособие / Е. М. Дурко, С. И. Фецак. Уфа: УГАТУ, 1996. 92 с.

4. **Кудояров, Р. Г.** Функционально-структурный синтез металлообрабатывающих станков с автоматическим управлением: Учеб. пособие / Р. Г. Кудояров. Уфа: УГАТУ, 2006. 82 с.

### ОБ АВТОРАХ



**Кудояров Ринат Габдулхакович**, проф. каф. мехатронных станочн. систем. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. разработки мехатрон. станочн. систем



**Дурко Евгений Маркович**, доц. той же каф. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1968). Канд. техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (МГТУ «Станкин», 1973). Иссл. в обл. динамики мехатрон. станочн. систем.



**Зальцберг Виктор Ксильевич**, доц. каф. металлорежущих станков и инструментов ПермГТУ. Дипл. инж.-механик (ППИ, 1961). Иссл. в обл. алмазно-абразивной обработки деталей машин.



**Юсупова Алла Владиславовна**, инженер-конструктор ОАО НИИТ. Дипл. инж. по мехатронике (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. разработки мехатрон. станочн. систем.



**Башаров Рашит Рамилович**, асп. каф. мехатронных станочн. систем. Дипл. инж. по мехатронике (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. разработки мехатрон. станочн. систем.