

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНОВ НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Н.Н. Подзоров (ООО «КоСПА»), О.И. Осипов (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»),  
Ю.А. Афанасьев (ООО «КоСПА»)

Проведен анализ требований к электроприводам зубообрабатывающего станка, работающего методом обката с непрерывным делением, предназначенного для изготовления прямозубых, косозубых цилиндрических шестерен и червячных зубчатых колес. Разработана новая структурная схема станка со взаимосвязанным электроприводом, который позволяет использовать метод электронной синхронизации позиционных электроприводов. Создана и проверена методика расчета мощностей электрического привода для зубообрабатывающих станков с учетом особенностей их работы. Предложена структура системы управления электроприводами для взаимосвязанного электропривода зубообрабатывающего станка. Метод перехода от группового к взаимосвязанному индивидуальному электроприводу существенно сокращает время простоя станка при единичном производстве и снижает требования к оператору станка.

Ключевые слова: контроллеры управления движением, контроллеры позиционирования, системы ЧПУ, мини микро-ПЛК, электропривод, зубообрабатывающий станок.

В настоящее время в металлообрабатывающей промышленности применяется множество различных станков с электрическим приводом. Оборудование используется для черновой, чистовой или комбинированной технологии обработки металлов. При создании любого металлообрабатывающего оборудования закладывается предположительное время его эксплуатации, и в большинстве случаев это время составляет примерно 10 лет. За время эксплуатации оборудования происходят качественные, а иногда и революционные изменения в конструкции, принципах управления оборудованием и программно-аппаратных средствах, используемых в станках. По истечении планируемого срока эксплуатации станка его экономические и технические показатели, как правило, не отвечают требованиям современного производства, недостаточная точность, низкая производительность и частые отказы требуют технического перевооружения производства. С увеличением срока эксплуатации станка его показатели будут ухудшаться.

На большинстве российских предприятий применяется оборудование советского и импортного производства, которое не проходит модернизацию для восстановления и улучшения характеристик уже не первый десяток лет. Характеристики такого оборудования существенно уступают современному оборудованию из-за устаревшего конструктива, изношенности механических элементов (механики) и повышенной вероятности отказа выработавших свой срок электрических и гидравлических элементов,

повышенного энергопотребления из-за устаревшей элементной базы. Один из способов устранения перечисленных недостатков — это продать имеющееся оборудование и приобрести новое, современное оборудование, которое будет соответствовать всем необходимым параметрам: точности и производительности, а также энергоэффективности. При этом помимо существенных финансовых затрат на само оборудование, потребуется квалифицированный оператор для этого станка, обслуживающий персонал и переоборудованное рабочее место, где будет установлен станок. Второй способ — модернизировать<sup>1</sup> уже имеющееся оборудование, применив современные технологические и конструктивные решения на имеющейся базе. В данном случае финансовые затраты уменьшатся, но возникает необходимость создания обходных технологий и технологий, замещающих выведенное из производственного процесса оборудование. После модернизации оборудование будет иметь лучшие показатели производительности, точности, ремонтнопригодности и энергоэффективности. Основной задачей модернизации может являться восстановление точностных параметров станка с улучшением потребительских параметров: время переналадки, удобство обслуживания, ремонтнопригодность и энергоэффективность. Другой задачей модернизации может быть перевод оборудования в наиболее высокий технический уровень, повышение точности обработки и производительности, увеличение степени автоматизации и применение современных технологий и инструмен-

<sup>1</sup> Модернизация — создание продукции с улучшенными потребительскими свойствами путем ограниченного изменения исходной продукции и взамен ее.

та. Дополнение возможностей оборудования новыми технологическими свойствами, такими как обмер и корректировки использования инструмента и загрузки, использование современных систем загрузки/выгрузки заготовок и деталей позволяет перевести оборудование после модернизации на новый более высокий технический уровень.

Модернизация ручных и полуавтоматических станков со связанной кинематикой<sup>2</sup> часто имеет специфическую проблему. Специфичность заключается в том, что для повышения точности нужно уменьшить количество кинематических цепочек — передаточных механизмов между рабочим органом и валом двигателя. Число шестерен в гитаре<sup>3</sup> [1] нет возможности уменьшить в связи с принципом работы и настройки станка. Также связанная кинематика требует высокоточных элементов кинематической цепочки, что технологически и экономически затруднительно. Поэтому применяется способ с развязкой кинематики и установкой на каждый рабочий орган независимого электрического привода. Иногда нецелесообразно полностью избавляться от передаточных механизмов в связи с тем, что тогда придется производить существенные конструктивные изменения в оборудовании, что экономически не выгодно и не отвечает точностным параметрам станка

Объектом исследования и применения технического решения по развязке кинематики является станок 53 А30, производства Егорьевского станкостроительного завода «Комсомолец». Станок относится к универсальным зубофрезерным полуавтоматам, работающим методом обката с непрерывным делением, и предназначен для производства прямозубых, косозубых цилиндрических и червяных зубчатых колес. Основной продукцией станка являются шестерни с прямым и косым зубом эвольвентного зацепления или зацеплением Новикова с возможностью модификации зуба по высоте (фланк, протуберанец) и по направлению (бочка, конус, комбинированный).

Зубофрезерный станок 53 А30 изготовлен со связанной кинематикой. В стандартном исполнении применяется большое число различных шлицевых валов, шестерен и гитар. Гитары применяются в часто перенастраиваемых цепях при большом диапазоне и количестве передаточных отношений органа настройки расчетной цепи. Эти механизмы отличаются простотой конструкции и трудоемкостью настройки. При каждой новой заготовке, отличной от предыдущей, требуется произвести расчеты и настроить гитару, что влечет за собой уменьшение общей производительности и увеличение вспомогательного времени цикла работы станка, а также увеличение трудоемкости. Для работы на станке требуется определенная специализированная квалификация персонала, кото-

рый с каждым годом все труднее и труднее найти, так как современный мир стремится к автоматизации технологического процесса, а система подготовки специалистов ориентирована на современные технологии.

Цель модернизации станка — повышение точности обработанных изделий, производительности, качества поверхности после обработки, уменьшение бракованных изделий и снижение требований к квалификации оператора станка. Также особое внимание уделяется эргономике станка, средствам и способам защиты зоны обработки.

Для достижения цели необходимо произвести анализ алгоритма работы станка, анализ механических и электрических компонентов станка, в связи с чем поставлены следующие задачи:

- изучить алгоритм работы оператора на станках до модернизации, для анализа временных зависимостей на изготовление детали и партии деталей;
- произвести анализ кинематики станка для расчета необходимых передаточных механизмов при развязке кинематики и определения оптимальных точек установки электроприводов в кинематических цепочках станка;
- произвести расчет нового электропривода, который будет применен при развязке кинематической цепочки станка;
- разработать требования к системе управления и подобрать необходимое оборудование для реализации циклов работы станка;
- произвести наладку и испытания работы системы после ее реализации.

#### Алгоритм работы со станком до модернизации

Алгоритм работы со станком зависит от типа изготавливаемой детали и опытности, и квалификации оператора, поэтому количественно определить время на изготовление детали возможно только теоретически. Последовательность работы оператора, при наладке станка и производства обработки, может немного варьироваться, но в основном она состоит из нескольких пунктов:

- чтение чертежа, расчет и подготовка необходимых инструментов к настройке станка;
- расчет и настройка гитар в соответствии с изготавливаемой деталью;
- установка фрезы и заготовки;
- дополнительная наладка оборудования для запуска цикла фрезерования (определение точки касания инструмента и заготовки, установка глубины врезания или разбивка резания на проходы, установка точек захода и выхода фрезы);
- фрезерование шестерни;
- обмер шестерни и извлечение готовой детали из станка;

<sup>2</sup> Связанная кинематика — кинематика, где через передаточные механизмы от одного двигателя приводится в движение два или более жестко взаимосвязанных рабочих органа.

<sup>3</sup> Гитара — это механизм со сменными зубчатыми колесами, предназначенный для ступенчатого изменения передаточного отношения расчетной кинематической цепи.

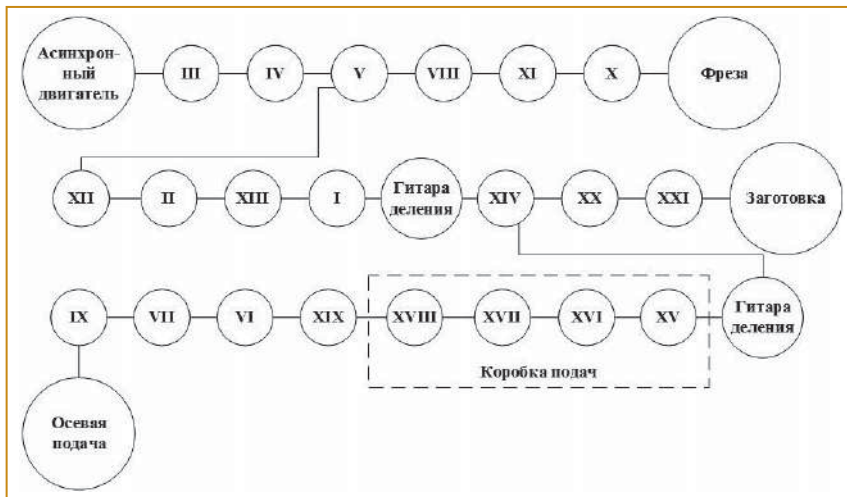


Рис. 1. Упрощенная структурная схема зубофрезерного станка

- корректировка наладки станка по полученным замерам и, возможно, повторная обработка для получения чертежных параметров детали.

Перечисленные пункты необходимы к выполнению для обработки каждой новой детали. В случае мелкосерийного или единичного производства настройка станка будет занимать существенный промежуток времени (в зависимости от опытности оператора). Непосредственно время самого фрезерования постоянно, так как оно закладывается технологией обработки, качеством инструмента и требованиями к обработанной поверхности. Помимо этого, если оператор ошибся в расчетах, то первая деталь уходит в брак или требуется повторная обработка, что нередко на станках такого типа. Ошибки могут появляться из-за фактического износа станка (люфты и потеря геометрии) и неточности срабатывания электрических компонентов.

#### Анализ кинематики станка

На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема зубофрезерного станка, где управление всеми осями производится от одного асинхронного двигателя. От двигателя идет длинная кинематическая цепочка (указана римскими цифрами), где присутствуют люфты, увеличивающиеся со временем. Помимо этого, присутствует большое число зубчатых зацеплений, качество которых сильно влияет на точность работы станка. Двигатель приводит в синхронное вращение фрезу (инструмент), стол (где установлена заготовка) и инструментальный суппорт (врезание инструмента в заготовку вдоль оси детали). В зубофрезерном станке есть второй асинхронный двигатель, который предназначен для ускоренных перемещений, но так как на технологию обработки он не влияет, поэтому мы его не указываем.

Для уменьшения времени при изготовлении шестерни и сокращения времени настройки станка принято решение развязать кинематически связанные оси станка и применить автоматический выход в ис-

ходные точки цикла. Для развязки кинематических связанных цепочек на каждую ось станка установлен собственный, независимый от других, электрический привод, который управляется через внешний контроллер управления движением. Таким образом, мы получаем станок с индивидуальным, редукторным, взаимосвязанным электроприводом с функцией электрического вала и с замкнутой системой управления на каждую ось.

Уточним понятие взаимосвязанного электропривода, используемое в данной статье. Взаимосвязанный электропривод: два или несколько электрически или механически связанных между собой электроприводов, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей и/или нагрузок, и/или положения исполнительных органов рабочих машин [2]. Однако там же в [2] даются следующие определения. Электропривод согласованного движения: электропривод, обеспечивающий согласованное движение двух или более исполнительных органов рабочей машины. Многокоординатный электропривод: электропривод, обеспечивающий движение исполнительного органа рабочей машины по двум или более пространственным координатам.

Эти определения рассматривают ситуации, когда требуемая технологией работы согласованность движений индивидуальных электроприводов, технологической установки, осуществляется средствами их управления, а физическая взаимосвязь между отдельными координатами или осями может быть через обрабатываемый материал или вообще отсутствовать. Индивидуальный электропривод, рассматриваемый в таком широком смысле, является альтернативой применявшимся ранее системам группового привода и механического распределения мощности между рабочими органами блока технологических узлов [3].

Для перехода к подбору необходимых двигателей требуется преобразовать кинематическую схему. На рис. 2 представлена переработанная структурная схема станка 53 А30. В этой схеме уменьшено число передаточных механизмов относительно исходной схемы. Полностью от старых передаточных механизмов уйти не удалось в связи с конструкцией станка, поэтому некоторые передаточные механизмы от двигателя М5 к фрезе остались. На конечный результат эти передаточные механизмы не повлияют, так как кинематическая цепь короткая, ось движется в одном направлении, и люфты выбираются, а большое передаточное отношение в конечном звене кинематической цепи препятствует раскрытию люфта.

На интерполируемых осях, которые участвуют в формообразовании модификаций зуба (вертикаль-

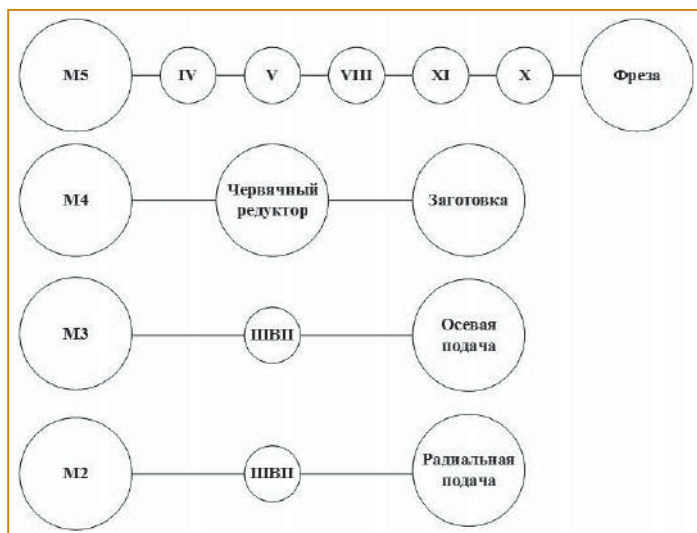


Рис. 2. Упрощенная структурная схема модернизированного зубофрезерного станка 53А30

ной и горизонтальной подачи), будут установлены моторы с планетарными редукторами.

На поворотном столе оставлен червячный редуктор, так как там не требуются большие скорости вращения, а люфт минимален из-за высокой точности изготовления червячной пары и малого бокового зазора в зацеплении.

**Расчет электроприводов станка**

На предыдущем шаге сделан вывод, что для развязки кинематики придется установить четыре электрических двигателя. Асинхронный двигатель для непозиционного привода на фрезу и три позиционных привода на оси подачи и вращения заготовки. При этом было разработано специальное ПО, позволяющее устанавливать непозиционную ось фрезы и позиционную ось заготовки в синхронную позицию из любой позиции.

Рассмотрим обозначение осей на станке;

1) ось В — это ось инструментального шпинделя, то есть вращения инструмента, в нашем случае — червячная фреза;

2) ось С — это ось шпинделя заготовки, то есть вращения заготовки (поворотный стол, с патроном для заготовки);

3) ось Х — радиальная подача заготовки на инструмент, то есть горизонтальное перемещение заготовки;

4) ось Z — осевая подача на заготовку, то есть вертикальное перемещение инструмента.

Для расчета двигателей необходимы параметры механизмов и усилие, которое требуется при обработке

заготовки. Все параметры рассчитаны и скорректированы из опыта работы инженерами-технологами и инженерами-механиками, которые учувствуют в разработке данной системы (табл. 1, 2).

Все параметры двигателей рассчитывались не стандартным методом [4], а с использованием современного ПО SigmaSelect для инженерных расчетов. В ПО SigmaSelect выбирается тип механизма, и задаются необходимые параметры элементов механизма, после чего строится циклограмма работы двигателя, и выбирается необходимый двигатель из предложенных вариантов. В результате расчетов составлена табл. 3.

**Разработка требований к системе управления взаимосвязанными электроприводами**

Для управления движением необходим контроллер с системой реального времени — программой, обеспечивающей обработку данных и выдачу заданий в пределах указанного временного цикла с учетом приоритетов. Для управления электроприводами в реальном времени требуется минимальный цикл приема/передачи данных. На применяемом контроллере цикл приема/передачи данных по шине Mechatrolink III составляет 0,5 мс. Такой короткий цикл приема/передачи данных позволяет производить точную синхронизацию и быструю реакцию между позиционными приводами, так как кратковременное рассогласование синхронизированных позиций и скоростей на 1% может привести к существенным погрешностям и дальнейшему браку детали. Помимо этого, у контроллера остается время на управление средствами автоматизации (дискретные и аналоговые входы/выходы, модули счетчиков и т.д.) и обмен информацией с оператором через НМІ панель.

Для взаимосвязи оператора станка и конечных рабочих органов с групповым электроприводом применена сенсорная панель оператора. Через последнюю оператор выбирает необходимый тип технологического процесса обработки детали, технологические параметры обработки, параметры инстру-

Таблица 1. Параметры поворотных осей

Ось	В	С
Тип оси	Поворотная	Поворотная
$J_{ро}, кг \cdot м^2$	0,126761	1,584144
$M_{сопр}, Н \cdot м$	370	100
$\mu$	0,4	0,4
$M_{тр}, Н \cdot м$	2,5	500
$i_m$	5,066667	72
$J_{с}, кг \cdot м^2$	0,007650	0,003367
$\eta_m$	0,735092	0,8

Таблица 2. Параметры линейных осей

Ось	X	Z
Тип оси	Линейная	Линейная
$m_{нагр}, кг$	30	10
$F_{сопр}, Н$	100	3300
$\mu$	0,4	0,4
$F_{тр}, Н$	14700	5000
Шаг ШВП, мм/об.	10	10
$\alpha, град$	0	90
$m_{ро}, кг$	1500	500
$J_{швп}, кг \cdot м^2$	0,118546	0,077264
$\eta_{швп}$	0,85	0,85
$i_m$	5	5
$J_{с}, кг \cdot м^2$	0,000200	0,000327
$\eta_m$	0,95	0,95

Таблица 3. Подбор электродвигателей удовлетворяющих условиям расчетов

Ось	$M_{эряв}, Н \cdot м$	$M_{макс}, Н \cdot м$	$N_{ном}, об./мин$	$N_{макс}, об./мин$	$J_{мех} \cdot 10^{-4}, кг \cdot м^2$	Двигатель
В	104	242	900	2500	125,63	АДЧР160S6Y3
С	9,38	14,8	360	2000	36,66	SGMGV-20DDA6F
Х	5,72	10,7	600	3000	50,94	SGMGV-13DDA6F
Z	5,35	9,19	600	3000	34,7	SGMGV-13DDA6H

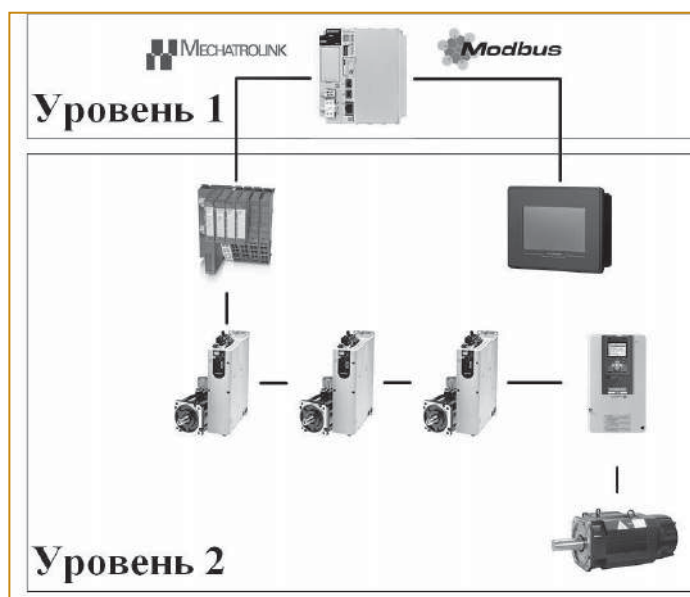


Рис. 3. Двухуровневая система управления зубофрезерным станком

мента и вводит параметры изделия, которое он хочет получить после обработки. Обработка может вестись как стандартизованным инструментом, так и специальным. Конечный результат обработки получается автоматически по результатам расчетов, которые выдают задания на координатные и траекторные перемещения для выполнения цикла обработки.

Для реализации работы зубофрезерного станка предложена и применена двухуровневая структурная схема (рис. 3), где на уровне 1 находится контроллер управления движением, а на уровне 2 находятся подконтрольные контроллеру устройства.

Контроллер производит все математические расчеты, которые раньше оператор настраивал при помощи гитары и конечных выключателей: расчет необходимого передаточного числа между шпинделем заготовки и инструментальным шпинделем для электрической синхронизации движения (между осями В и С), расчет глубины врезания для горизонтальной и вертикальной осей подач (Z и X), доворот при изготовлении косозубых шестерен и др. Помимо этого, через сенсорную панель ведется контроль работы станка и действий оператора, чтобы можно было создать базу данных. По базе данных видно реальную загруженность станка и ответственность оператора при работе с оборудованием. На панели оператора создан архив деталей. Данные по каждой обработанной детали могут быть сохранены в архиве и загруже-

ны из архива без повторного ввода данных детали. Каждый экран управления станком сопровождается текстовым файлом подсказки (Help), где описаны возможности и задачи экрана. На экран можно оперативно вывести полное руководство оператора для изучения и ознакомления

#### Практические испытания

После монтажа оборудования на станок, написания и отладки программного алгоритма работы станка произведено снятие среднеквадратичного момента при работе станка и определение момента инерции нагрузки через встроенные функции сервопривода и программное обеспечение SigmaWin 7. Измеренные параметры представлены в табл. 4. Измерение среднеквадратичного момента производилось при загруженности станка на 60% от максимально расчетного. Момент инерции измерялся только для неизменных частей передаточного механизма, то есть без установленной заготовки и без установленного инструмента.

Исходя из представленных данных, сделан вывод, что методика расчета электрического привода может быть применена на станках аналогичного типа. Электропривод, подобранный по этой методике, будет удовлетворять силовым требованиям технологии при изготовлении шестерни, а также будет удовлетворять скоростным и точностным характеристикам.

Запас в расчете момента инерции на осях С и X можно объяснить тем, что расчет производился с учетом максимальной загруженности станка. Погрешность момента инерции с осью Z будет исследоваться для выявления недочетов в методике расчета и усовершенствования станка.

#### Выводы

В результате работы произведен анализ требований к электроприводам зубообрабатывающего станка и разработана новая структурная схема с взаимосвязанным электроприводом, который позволяет использовать метод электронной синхронизации позиционных электроприводов. Этот метод исключает люфты в механических передачах и существенно ускоряет и упрощает работу оператора со станком. Помимо этого, для работы со станком требуется меньшая квалификация оператора при настройке и эксплуатации, а также режим самообучения с использованием текстовых подсказок на каждом экране.

Создана и проверена методика расчета мощностей электрического привода для зубообрабатывающих станков с учетом особенностей их работы. В методике есть некоторые допущения при расчете, не влияющие на конечный результат, но над этим будет вестись дополнительная работа, чтобы в дальнейшем унифицировать расчет под все зубообрабатывающие станки.

Произведен синтез эффективной структуры системы управления электроприводами для взаи-

Таблица 4. Сравнение рассчитанных и измеренных параметров позиционного электропривода

Ось	Расчетный $M_{срkv}, Н*М$	Измеренный $M_{срkv}, Н*М$	Расчетный $J_{мех}, 10^{-4} кг*М^2$	Измеренный $J_{мех}, 10^{-4} кг*М^2$
С	9,38	5,67	36,66	13,06
X	5,72	2,55	50,94	7
Z	5,35	4,59	34,7	44,54

мосвязанного электропривода зубообрабатывающего станка.

В промышленности используется большое число группового электропривода при зубообработке, который уступает по своей функциональности индивидуальному приводу по таким параметрам, как: точность, производительность, шум, гибкость настройки, необходимость наличия в штате рабочего персонала, владеющего советующей квалификацией для обслуживания и работы оборудования. Предложенный метод перехода от группового к взаимосвязанному индивидуальному электроприводу существенно сокращает время простоя станка при единичном производстве. Оператором станка может

быть специалист средней квалификации при мелко-серийном производстве или промышленный робот, если производство крупносерийное.

#### Список литературы

1. Справочник молодого зуборезчика. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988- 230 с
2. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. Издание четвертое. М.-Л. Энергия 1965г. 544 с.
3. Ферстер Г.Г. Электрооборудование и электроснабжение установок гидромеханизации. Учебник для техникумов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977. -448 с.
4. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ. 2007. -234.с.

*Подзорев Никита Николаевич — главный специалист по приводной технике,  
Афанасьев Юрий Анатольевич — руководитель проектов зубофрезерных станков ООО «КоСПА»,  
Осипов Олег Иванович — д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ».  
Контактный телефон +7 (495) 660-28-22.  
[Http://www.cospa.ru](http://www.cospa.ru)*

DOI: 10.25728/avtprom.2020.05.11

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОЧИХ МЕСТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРСОНАЛА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**Е.М. Абакумов (Корпорация РОСАТОМ),**

**Н.О. Кожевников, С.Б. Казанбеков (ВНИИА им. Духова),**

**И.С. Решетников (ИПУ РАН)**

*Рассматривается вопрос предоставления информации в электронном виде на цеховом уровне предприятий, совмещающих разработку сложных изделий с многономенклатурным единичным и мелкосерийным дискретным производством. Предлагается структура системы информационной поддержки производственного персонала, рассматривается функциональность ее отдельных модулей. Указаны преимущества от использования такой системы на цеховом уровне приборостроительного предприятия.*

*Ключевые слова: информационное обеспечение рабочего места, техническая документация, система поддержки принятия решений, производственный персонал, безбумажное производство, система управления документами.*

#### Введение

Важным вопросом в рамках цифровизации производства является предоставление информации в электронном виде на цеховом уровне предприятий. Анализ деятельности ряда приборостроительных предприятий, совмещающих разработку изделий с многономенклатурным единичным и мелкосерийным дискретным производством, показывает востребованность в специализированном программно-техническом решении по поддержке производственного персонала в части информационного обеспечения. Для информационной поддержки рабочих сегодня предлагаются самые разные решения, большинство из которых ориентировано на крупносерийные производства. Однако описание структуры универсальной системы информационной поддержки цехового уровня в литературе авторам не встречалось.

Универсальная система призвана обеспечить возможность быстрого получения и анализа нужной

в цехе информации из разнородных источников и производственных систем предприятия, поскольку существующие возможности получения информации в цехе, как правило, ограничены завязкой на бумажные экземпляры документов, а если и используются электронные экземпляры, то необходимая информация рассредоточена по разным системам, то есть отсутствует единое информационное пространство и единая точка доступа ко всей необходимой на цеховом уровне информации [1]. В [2] предлагается архитектура производственной информационной шины, которая будет функционировать на умном заводе для сбора, анализа и применения информации на уровнях оборудования, цеха, завода и планирования ресурсов (ERP), однако реализация такой шины требует серьезных инфраструктурных затрат и вложений. Другим аспектом универсальности системы является возможность как ее обособленного развертывания и внедрения, так и в составе автоматизированной си-