

## ПРИВОД ПОДАЧИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА

В работе описан привод подачи режущего инструмента специального металлообрабатывающего станка. На основе анализа технологии фрезерования заданного регулярного рисунка вафельного фона и особенностей работы оборудования предложено заменить традиционную шарикоподшипниковую передачу в составе привода подачи режущего инструмента на плоский совмещенный кривошипно-ползунный механизм. Геометрические параметры рычажного передаточного механизма рассчитаны в соответствии с известными размерами регулярного рисунка ячейки и рекомендованным значением угла передачи движения. Анализ кинематических и силовых характеристик рычажного механизма позволил обосновать технические характеристики электродвигателя. Для реализации требуемого трапецеидального закона изменения скорости выходного звена решена обратная задача кинематики, получены численные значения мгновенной угловой скорости входного кривошипа и импульсные управляющие сигналы на серводвигатель.

**Ключевые слова:** привод подачи, кривошипно-ползунный механизм, закон движения, «особые» положения, сервопривод, система управления.

**Введение.** В авиационных и космических аппаратах вес конструкции является критическим фактором для увеличения массы полезного груза при неизменной мощности двигателей [1, 2]. Вафельные панели в конструкции корпусных деталей и в элементах обшивки перспективных образцов вышеуказанных образцах техники позволяют решить поставленную задачу. В топливных баках, отсеках ракет, корпусных деталях используется вафельная конструкция обечайки, выполненная из высокопрочных алюминиевых сплавов, что обеспечивает решение приоритетной задачи отрасли — увеличение полезной нагрузки за счет уменьшения массы ракетносителя. Трудоемкость технологии изготовления таких изделий вызвана сложностью обеспечения точности и совершенства формы ячеек из облегченных материалов при соблюдении оптимальной конструкции подкрепляющего набора ребер вафельного фона ортотропных оболочек и вафельных обечаек [2–5]. Широкое применение обечаек с вафельной конструкцией обусловлено тем, что эти изделия менее чувствительны к локальным вмятинам глубиной до половины высоты вафельной панели и обладают значительно большей несущей

способностью при осевом сжатии, чем равные им по весу гладкие [6].

Технология изготовления панелей с вафельным фоном за рубежом не существенно отличается по последовательности операций от отечественной. Отличие в производительности операций по изготовлению ячеек вафельного фона за счет повышения мощности приводов до сотен киловатт и повышения габаритов и стоимости оборудования. Этот путь повышения производительности дошел до пределов.

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы, посвященной металлорежущему оборудованию для выполнения фрезерной обработки вафельного фона показал, что основная проблема повышения производительности технологической операции заключается в скорости работы привода подачи режущего инструмента.

Традиционно для перемещения фрезы используется шариковинтовая передача, которая с учетом узкого интервала движения в габаритах ячейки быстро изнашивается, как следствие — снижается производительность и точность обработки. Сдерживающим фактором для увеличения произво-

длительности такого оборудования также является масса подвижных узлов привода подачи режущего инструмента. Перемещение массивной конструкции на больших скоростях приводит к появлению вибрации и ударов, как следствие — к снижению ресурса станка.

В работах [6–8] указано, что ограничения при получении вафельной конструкцией возникают, когда силы резания становятся эквивалентны силам деформации тонкостенных элементов. Причиной этого являются режимы резания и применение инструмента большого диаметра. Таким образом, требуется разработать привод подачи фрезерного станка для обработки типового элемента вафельной конструкции, чтобы обеспечить сохранение совершенства формы кармана и повышение производительности технологической операции.

Повышение производительности достигается за счет перехода на сверхскоростное фрезерование со скоростями подач более 40 м/мин и скоростей резания до 1000 м/мин. Это требует уменьшения веса движущихся частей привода и повышения его динамики. Силы резания на этих режимах снижаются в разы.

Новизной и практической новизной работы является:

1. Разработанная методика теоретического расчета и экспериментальной корректировки рациональных параметров закона движения привода подачи, включая участки разгона, торможения и равномерного перемещения и необходимой мощности синхронного двигателя

2. Достижение производительности фрезерования ячеек вафельного фона, за счет повышения скоростей подач, существенно выше по сравнению с лучшими мировыми образцами оборудования за счет применения в механизме подач станка привода на базе кривошипно-ползунного механизма с массой движущихся частей не более 300 Н, включая противовес. Компенсации динамических сил происходят внутри жесткой конструкции механизма.

**Привод подачи фрезерного станка для обработки вафельных панелей.** Листовой материал заготовки вафельной панели в процессе обработки с учетом ее массогабаритных размеров неподвижен, поэтому предъявляются высокие требования к точности позиционирования обрабатывающей головки. Привод подачи режущего инструмента специальных фрезерных станков для обработки вафельного фона имеет значительную массу, что оказывается сдерживающим фактором при высокоскоростной обработке, не позволяющим выйти на номинальные обороты на заданных габаритах ячейки. Традиционно в качестве исполнительного механизма привода подачи используется шариковинтовая передача, которая при движении в узком диапазоне быстро вырабатывает свой ресурс, как следствие — снижается точности обработки.

Для повышения производительности фрезерования вафельного фона предлагается использовать плоский совмещенный кривошипно-ползунный рычажный механизм (рис. 1), обеспечивающий возвратно-поступательное движение режущего инструмента в заданном диапазоне.

Повышение производительности фрезерной обработки вафельного фона в этом случае достигается за счет высокой скорости вертикального перемещения обрабатывающей головки до 40 м/мин (частота вращения шпинделя 40 000 об/мин). На указанной частоте за один проход фреза диаметром 10 мм сни-

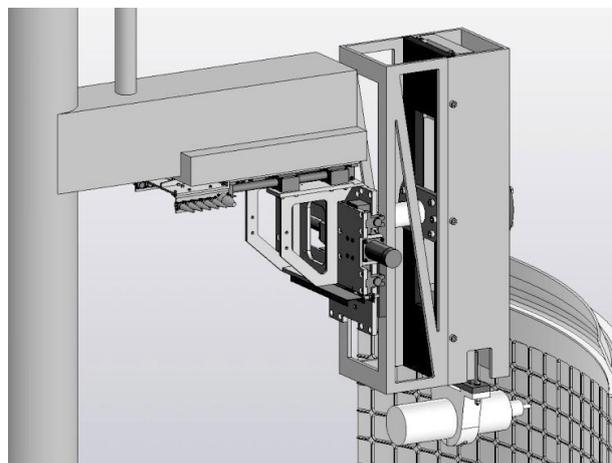


Рис. 1. Общий вид привода подачи фрезерного станка

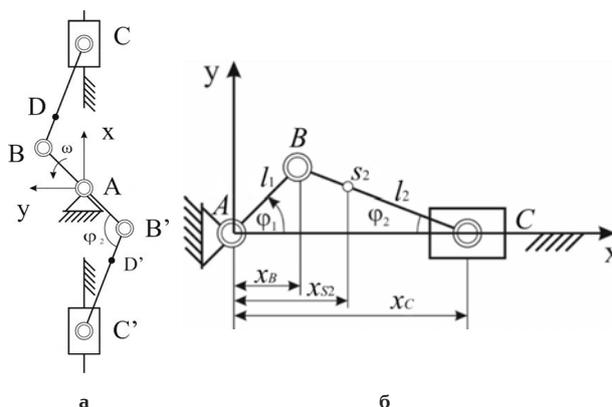


Рис. 2. Схема плоского совмещенного кривошипно-ползунного механизма а — совмещенный механизм, б — расчетная схема кинематического анализа:

$\varphi_1$  — обобщенная координата, т.е. угол поворота входного кривошипа  $AB$  (рад),  $\varphi_2$  — угол поворота шатуна относительно оси  $Ax$  (рад)

мает слой металла в 1 мм с ячейки размерами 70×70 за 1 секунду (ход ползуна 60×60 мм). Таким образом, на обработку припуска в 12 мм потребуется 12 секунд.

**Рычажный передаточный механизм привода подачи фрезерного станка для обработки вафельных панелей.** Кривошипно-ползунные механизмы находят широкое применение в технике, например, в автомобильных двигателях внутреннего сгорания [9], в прессах [10–11], в промышленных роботах и установках [12] и в других механических системах для выполнения различных технологических операций.

Структурная схема плоского совмещенного кривошипно-ползунного механизма (рис. 2а) состоит из стойки  $A$ , сдвоенного кривошипа  $BAB'$ , двух шатунов  $BC$  и  $B'C'$ , двух ползунов  $C$  и  $C'$ , сопряженных одноподвижными кинематическими парами  $V$  класса. Несмотря на широкую известность данного механизма, его широкое применение в составе различных технических устройств порождает большое количество публикаций, посвященных вопросам синтеза, кинематического и динамического анализа [11–14]. Исходя из известных габаритных размеров ячейки вафельного фона, определены геометрические параметры совмещенного кривошипно-рычажного механизма: длина плеч сдвоенного

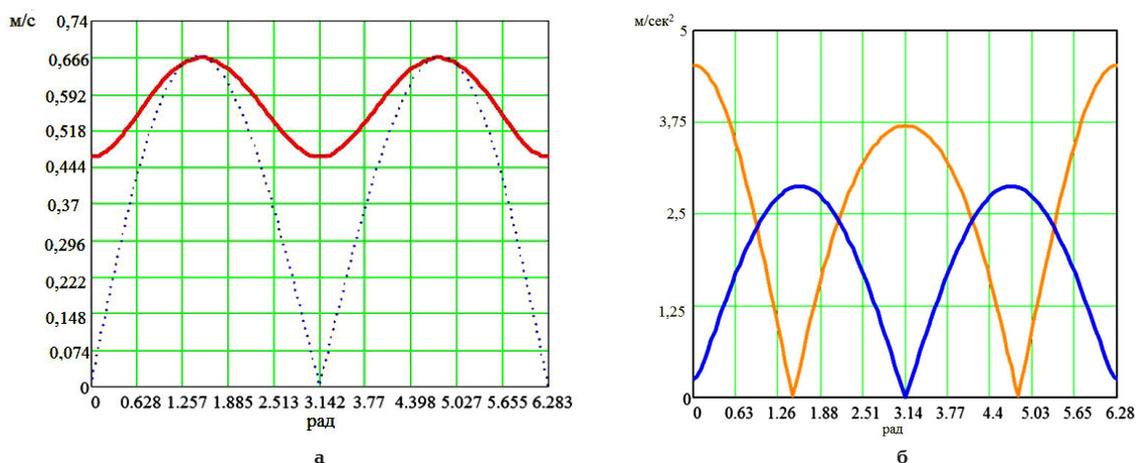


Рис. 3. Диаграммы изменения кинематических характеристик точек D и C звеньев кривошипно-ползунного механизма: а — абсолютные скорости (м/сек) ..... С — D; б — абсолютные ускорения — С — D (м/сек<sup>2</sup>)

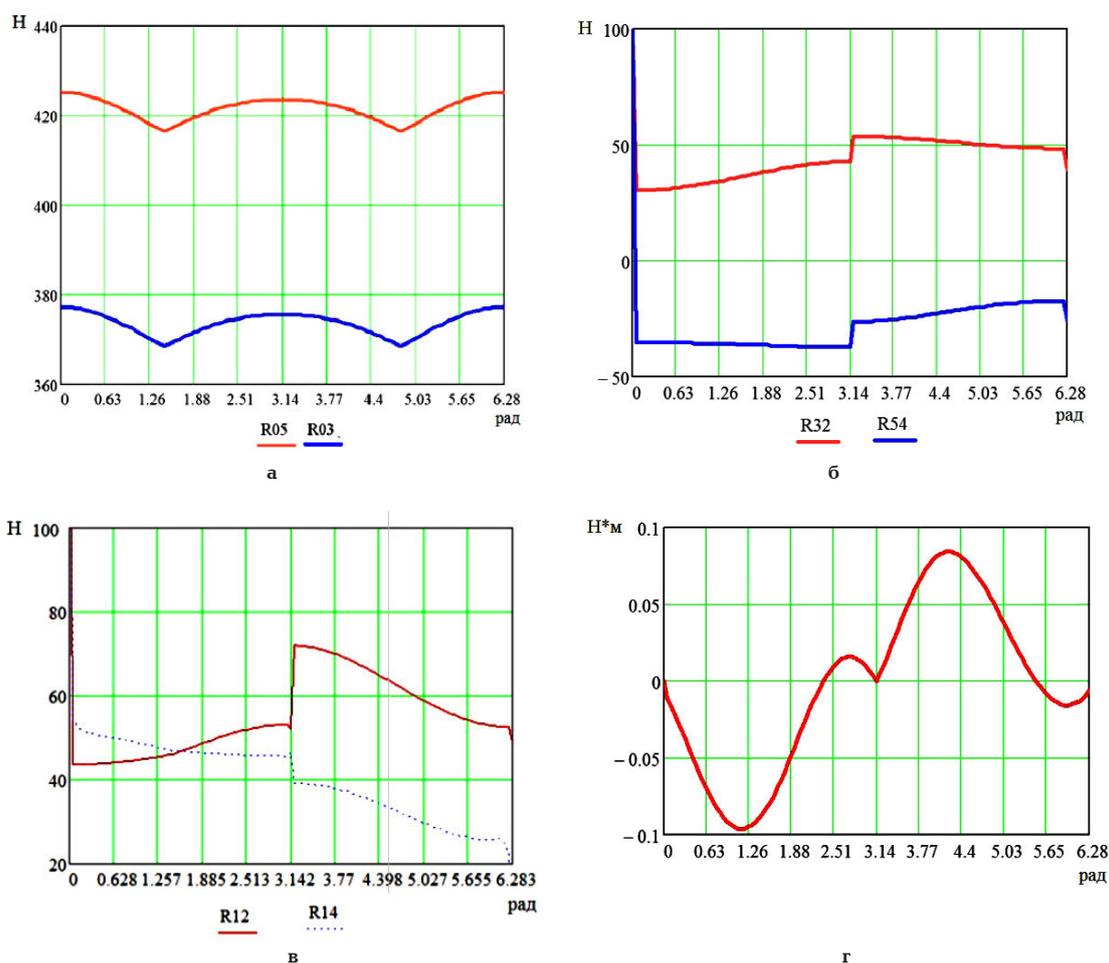


Рис. 4. Диаграммы изменения сил реакций (а-в) в подвижных сочленениях рычажного механизма и уравновешивающего момента (г)

кривошипа равна  $r_{AB} = r_{AB'} = 30$  мм, длина шатунов составляет  $L_{BC} = L_{B'C'} = 300$  мм, ползуны C и C' имеют размеры 240×200 мм. Для оценки реализации заданной функции перемещения выходного звена, режима его работы, передачи усилий разработаны соответствующие математические модели, на основе известных в теоретической механике и теории механизмов и машин методов. На первом этапе исследования рассматривался режим равномерного движения входного кривошипа AB с постоянной

угловой скоростью  $\omega_1 = 200$  об/мин  $\approx 20,944$  рад/с. Ввиду симметричности кинематических цепей ABC и AB'C' для анализа кинематики механизма необходимо и достаточно рассмотреть одну из них (рис. 26). Результаты вычислительных экспериментов в математическом пакете Mathcad представлены на рис. 3 и 4. Перемещение центра масс ползуна C за один цикл движения составляет требуемые 60 мм.

Известно, что в процессе движения кривошипно-ползунные механизмы проходят два особых

(сингулярных) положения [15], что приводит к резкому изменению кинематических характеристик, приводящих к затратам мощности на преодоление сопротивления перемещения. Из диаграмм изменения абсолютной скорости характерных точек  $D$  (центра масс шатуна  $BC$ ) и  $C$  (центра масс ползуна  $C$ ) кривошипно-ползунного механизма (рис. 3а) следует, что мгновенные остановки выходного звена происходят при, где  $\varphi_2$  — обобщенная координата (угол поворота кривошипа  $BAB'$  относительно оси  $Ax$  введенной неподвижной декартовой системы координат  $Axy$ ).

Максимальная расчетная скорость точек  $C$  и  $D$  принята 0,66 м/сек, характер движения на участках разгона и торможения одинаковый. Кривые на рис. 3б соответствуют смене ускоренного и замедленного режимов движения ползуна  $C$  и шатуна  $BC$ . Максимальное ускорение ползуна в диапазоне начальный и конечный момент, т.е. для  $\varphi_1 = 0$  рад или  $\varphi_1 = 6,28$  рад, составляет 4,59 м/сек<sup>2</sup>. Анализ условий передачи движения в плоском совмещенном кривошипно-ползунном механизме позволил оценить технические характеристики электродвигателя для обеспечения разгона до 40 м/мин на участке 5 мм, при массе движущихся частей 300 Н. Затраченная мощность должна быть в пределах 1 кВт и крутящий момент до 4 Н·м без учета потерь в механизме.

Кинестатический расчет выполнен с учетом допущения, что трение в подвижных сочленениях отсутствует за исключением движения выходного ползуна вдоль направляющих. Проектируемый привод подачи фрезерного станка перемещает электродвигатель обрабатывающей головки, в расчетной схеме на выходном ползуне  $C$  представлен полезной нагрузкой  $\overline{G}_H = 20 \text{ Н}$ . Ее вес уравновешен на ползуне  $C'$  дополнительным грузом. Сила резания принята  $\overline{N}_H = 50 \text{ Н}$ .

Численное решение задачи кинестатического анализа совмещенного кривошипно-ползунного механизма в «особых» (сингулярных) положениях отсутствует (на графиках на рис. 4 приняты произвольно большие значения — 100 Н, для реакций  $\overline{R}_{12}, \overline{R}_{14}, \overline{R}_{32}, \overline{R}_{54}$ ). На практике происходит взрывной рост сил реакций в подвижных сочленениях, механизм преодолевает эти положения за счет инерции. Расчетная схема силового анализа механизма приведена на рис. 5.

Различие модулей реакций  $\overline{R}_{03}$  и  $\overline{R}_{05}$  (рис. 4а), возникающих между неподвижным основанием и ползунами  $C$  и  $C'$ , объясняется циклическим изменением характера сил тяжести и трения, которые в прямом направлении действуют как вредные, а в обратном — как полезные. Следует отметить, что «особые» положения наблюдаются в шарнирах  $C$  и  $C'$  (рис. 6б) и  $B$  и  $B'$  (рис. 6в), значение модулей которых не представляется оценить численно. Модуль уравновешивающего момента (рис. 6г) для исследуемого механизма составил 0,2 Н·м. Эта составляющая сил вызывает вибрации и удары при работе механизма. При повышении частоты вращения вала она увеличивается.

**Системы автоматического управления электродвигателем привода подачи фрезерного станка для обработки вафельного фона.** Традиционный подход к управлению рычажными передаточными механизмами предполагает, что скорость ведущего приводного звена постоянна, что неэффективно для предлагаемого привода подачи. На рис. 6 приведена структурная схема системы управления приводом

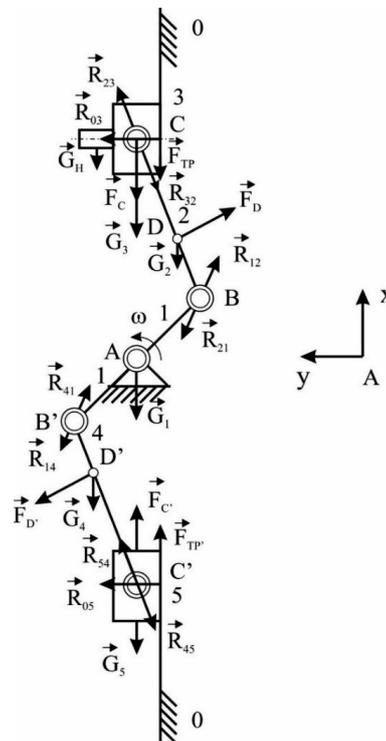


Рис. 5. Расчетная схема силового анализа



Рис. 6. Структурная схема системы управления приводом подачи

подач рычажного механизма, позволяющая изменять по заданному закону частоту вращения входного звена — асинхронного двигателя. Требуется реализовать трапецеидальный закон изменения скорости выходного ползуна  $C$  (привода подачи кривая 2 на рис. 7), т.е. уменьшить интервалы разгона и торможения, увеличив участок перемещения с постоянной скоростью перемещения на уровне  $V_{заг} = 40$  м/мин, таким образом, синтезировать сложный закон изменения угловой скорости ведущего приводного звена.

В приводе подачи используется синхронный электродвигатель DELTA со встроенной обратной связью по скорости и положению. Модель ЕСМА-Е11310GS имеет следующие важные для предлагаемого технического решения привода подачи технические характеристики: дискретность углового положения вала двигателя — более миллиона на один оборот, диапазон угловой скорости — от 0 до 6000 об/мин, возможность остановки вала в любом положении с номинальным крутящим моментом неограниченно долгое время. Этот двигатель обладает достаточными характеристиками по мощности 1 кВт, частоте вращения 0–6000 об/мин и крутящему моменту 4,77 Н·м для обеспечения работоспособности привода и позволил достичь рабочей скорости привода 6 Гц, т.е. 43 м/мин подачи. Большей частоты достичь не получилось из-за появления ударной нагрузки.

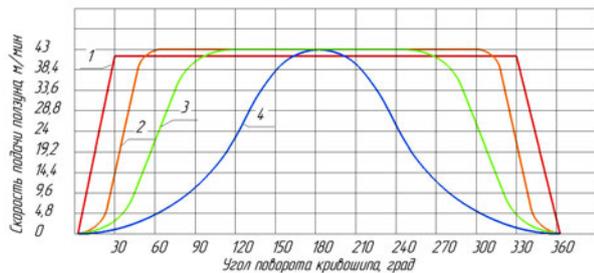


Рис. 7. Вычислительный и натурный эксперименты. Графики перемещения ползуна С (1 — график расчетный, 2 — движение с ударной нагрузкой, 3 — движение без ударной нагрузки, 4 — гармонические колебания с постоянной частотой вращения вала двигателя)

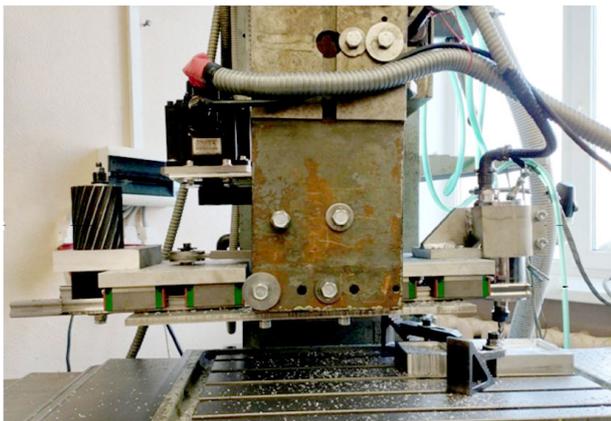


Рис. 8. Экспериментальная установка

Использовать можно любые типы двигателей, применяемых в системах станков с ЧПУ и управляемых от контроллеров. Масса и габариты двигателя не окажут существенного влияния на работу кривошипно-ползунного механизма. Основные условия — это частота вала двигателя, его мощность и крутящий момент.

Система автоматического управления (рис. 8) приводом подачи фрезерного станка построена на базе программируемого логического контроллера FATEK серия FBs, который по протоколам RS-485 и Modbus получает и передает информацию в сервопреобразователь ASD A2-1021-M.

Для реализации требуемого закона перемещения выходного звена кривошипно-ползунного механизма решена обратная задача кинематики. В расчетах используется приближенная зависимость:

$$n \cong r_{AB} \cdot V_{заг} / \left[ \pi \cdot \lambda \cdot \left( \sin(\varphi_1) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2\varphi_1) \right) \right],$$

где  $\varphi_1$  — угол поворота кривошипа от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ,  $V_{заг} = 40$  м/мин  $\approx 0,66667$  м/сек,  $\lambda = r_{AB}/L_{BC}$ .

Получен массив численных значений мгновенной угловой скорости вала сервопривода для значений угла поворота входного кривошипа от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с заданным шагом, равным  $3^\circ$ . В начале диапазона результаты, полученные по приближенной зависимости, дают большую погрешность, поэтому вручную установлены максимально допустимые обороты на основании паспортных данных. Далее вычисляется управляющий сигнал на электродви-

гатель с учетом, что количество опорных значений ограничено и равно 60 точкам, и максимальное значение задано 80 000 накопленных импульсов на полный оборот.

Попытка реализовать траекторию 1 (рис. 7) привела к запредельным ударным нагрузкам механизма при частоте вращения вала 4 Гц. Траектория 4 не вызывает ударных нагрузок при 7 Гц. Траектория 2 сопровождается ударной нагрузкой. Траектория 3 не вызывает ударной нагрузки — принята за рабочую при частоте 6 Гц, т.е. скорости подачи 43 м/мин. При демонтаже шпиндельного узла и противовеса на ползунах (снижение веса платформ до 6 кг) — возможна безударная работа на частоте 7 Гц на траектории 2. При обработке ячейки различий в работе механизма в холостую и с контактом с деталью — не установлено.

Проверка корректности расчетов проведена на математических моделях кинематики и кинестатики в среде Matlab, а также на лабораторном стенде с физическим прототипом устройства (рис. 8).

Результаты экспериментов подтверждают достижение требуемых кинематических характеристик движения выходного звена совмещенного кривошипно-ползунного механизма, т.е. достигнутой скорости подачи 43 м/мин, при расчетных 40 м/мин. Достигнута производительность — обработка одной ячейки вафельного фона на сплаве Д16Т размером  $70 \times 70 \times 7$  мм фрезой диаметром 10 мм за 12 секунд машинного времени.

**Закключение.** В работе предложена конструкция привода подачи режущего инструмента специального фрезерного станка для обработки вафельного фона на листовом материале на базе плоского совмещенного кривошипно-ползунного механизма, который благодаря конструкции обеспечивает уравновешивание сил инерции. Геометрические параметры механизма рассчитаны исходя из известных размеров ячейки вафельного фона и ограничений на угол передачи движения. Проведенный кинематический и кинестатический анализ механизма с учетом его вертикального размещения на стойке специального фрезерного станка подтвердил реализацию выходным ползуном заданной траектории движения, а также позволил оценить крутящий момент входного вала, как следствие сформулировать требования к техническим параметрам электропривода. Рычажный исполнительный механизм привода подачи фрезерного станка приводится в движение синхронным сервоприводом DELTA модель ЕСМА-Е11310GS со штатным блоком управления ASD-A2-1021-M, система управления реализована на базе ПЛК FATEX серии FBs.

Проведенная серия экспериментов на математической и физической моделях прототипа привода подачи фрезерного станка для обработки вафельного фона подтвердила достоверность теоретических моделей, работоспособность конструкции и рост скорости обработки ячеек вафельного фона. Достигнута производительность — обработка одной ячейки вафельного фона на сплаве Д16Т размером  $70 \times 70 \times 7$  мм фрезой диаметром 10 мм за 12 секунд машинного времени.

#### Библиографический список

1. Калуга Е. С. От самолетов к ракетам и космическим кораблям. Москва: Воздушный транспорт, 2001. 232 с. ISBN 5-88821-041-2.

2. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. Москва: Машиностроение, 1976. 408 с.
3. Sabir R., Khan A. A., Hasham H. J. [et al.]. A survey of recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // Journal of Space Technology. 2015. Vol. 5, no. 1. P. 103–115.
4. Кривонос Е. В. Исследование деформации обечайки с вафельным подкреплением при вальцевании и разработка метода компенсации отклонений формы // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 4. С. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98. EDN: AKTZXB.
5. Данченко В. Г., Шевцов Е. И., Гусев В. В. Способ оптимизации массы локально нагруженных отсеков ракет вафельной конструкции // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2017. № 2. С. 131–136.
6. Батрутдинов Р. Г., Сысоев С. К. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1, № 7. С. 7–8. EDN: ТАOUWT.
7. Михрютин В. В., Шерстобитов М. А. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. 2012. № 2. С. 279–284. EDN: PPMNXB.
8. Зайцев А. М., Шачнев С. Ю., Грубый С. В. Оптимизация режимов резания при фрезеровании карманов обечайки с вафельной конструкцией // Космическая техника и технологии. 2020. № 3. С. 14–23. DOI: 10.33950/spacetechn-2308-7625-2020-3-14-23.
9. Jalili N., Wagner J., Dadfarnia M. A piezoelectric driven ratchet actuator mechanism with application to automotive engine valves // Mechatronics. 2003. Vol. 13, no. 8. DOI: 10.1016/S0957-4158(03)00009-6.
10. Zheng E., Zhou E. X. Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system // Mechanism and Machine Theory. 2014. Vol. 74. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015.
11. Chen Y., Sun Y., Don Y. Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance // Mechanism and Machine Theory. 2017. Vol. 31, no. 1. P. 75–85. DOI: 10.1007/s12206-016-1209-z.
12. Koser K. A slider crank mechanism based robot arm performance and dynamic analysis // Mechanism and Machine Theory. 2004. Vol. 39, no. 2. P. 169–182. DOI: 10.1016/S0094-114X(03)00112-5.
13. Дворников Л. Т., Большаков Н. С. Теория кривошипно-ползунных механизмов: моногр. Новокузнецк: НПФ, 2008. 138 с. ISBN 978-5-8441-0282-0.
14. Белов И. В., Семенов Д. В., Белов А. А. Кривошипно-ползунный механизм с двумя шатунами // Оригинальные исследования. 2023. Т. 13, № 8. С. 20–27.
15. Гебель Е. С., Самсонов В. А. Особенности бифуркаций в плоских четырехзвенных механизмах // Восьмые Омские чтения: материалы докл. междунар. конф. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ, 2013. С. 109–112.

---

**ГЕБЕЛЬ Елена Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 1256-0879

ORCID: 0000-0003-1811-8755

AuthorID (SCOPUS): 55574609100

ResearcherID: O-4211-2014

Адрес для переписки: gebel\_es@spbstu.ru

**ПОПОВ Андрей Юрьевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4871-2344

ORCID: 0000-0002-7703-9283

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

Адрес для переписки: popov\_a\_u@list.ru

**ДРОЗДОВ Игорь Николаевич**, начальник цеха АО ФНПЦ «Прогресс», г. Омск.

Адрес для переписки: seh2@progress-omsk.ru

#### Для цитирования

Гебель Е. С., Попов А. Ю., Дроздов И. Н. Привод подачи режущего инструмента фрезерного станка для обработки вафельного фона // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 21–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-21-28.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024 г.

© Е. С. Гебель, А. Ю. Попов, И. Н. Дроздов

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg  
Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Omsk State  
Technical University,  
Omsk, Russia

<sup>3</sup> JSC Federal Research  
and Production Center «Progress»,  
Omsk, Russia

## CUTTING TOOL FEED DRIVE OF WAFER BACKGROUND MILLING MACHINE

The paper describes the process of designing the cutting tool feed drive of a special metalworking machine, which due to the circuit solution and automatic control system will increase the productivity of processing one cell of wafer background on sheet material up to 10–15 seconds. On the basis of the analysis of the technology of milling of a given regular pattern of wafer background and peculiarities of the equipment operation it proposed to replace the traditional ball bearing gear in the cutting tool feed drive with a flat combined crank-slide mechanism. Geometrical parameters of the lever transmission mechanism calculated in accordance with the known dimensions of the regular cell pattern and the recommended value of the angle of motion transmission. The analysis of kinematic and power characteristics of the lever mechanism allowed to justify the technical characteristics of the electric motor. In order to realize the required trapezoidal law of the output link speed change, the inverse problem of kinematics solved, numerical values of the instantaneous angular velocity of the input crank and pulse control signals to the servomotor obtained.

**Keywords:** feed drive, crank-slider mechanism, motion law, special positions, servo drive, control system.

### References

1. Kaluga E. S. Ot samoletov k raketam i kosmicheskim korablyam [From aeroplanes to rockets and spaceships]. Moscow, 2001. 232 p. ISBN 5-88821-041-2. (In Russ.).
2. Lizin V. T., Pyatkin V. A. Proyektirovaniye tonkostennykh konstruksiy [Design of Thin-Walled Structures]. Moscow, 1976. 408 p. (In Russ.).
3. Sabir R., Khan A. A., Hasham H. J. [et al.]. A survey of recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // Journal of Space Technology. 2015. Vol. 5, no. 1. P. 103–115. (In Engl.).
4. Krivosos E. V. Issledovaniye deformatsii obechayki s vafel'nykh podkrepleniym pri val'tsevanii i razrabotka metoda kompensatsii otkloneniy formy [Investigation of deformation of shell with waffle reinforcement during rolling and development of method for compensation of deviations forms] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. Ser. Aviatsonno-Raketnoye i Energeticheskoye Mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020. Vol. 4, no 4. P. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98. EDN: AKTZXB. (In Russ.).
5. Danchenko V. G., Shevtsov E. I., Gusev V. V. Sposob optimizatsii massy lokal'no nagruzhennykh otsekov raket vafel'noy konstruksii [Method of mass optimisation of locally loaded rocket compartments of waffle design] // Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoye vooruzheniye. Space Technology. Rocket Armament. 2017. No. 2. P. 131–136. (In Russ.).
6. Batrutdinov R. G., Sysoyev S. K. Tekhnologiya izgotovleniya vafel'nogo fona v obechaykakh letatel'nykh apparatov [Technology of manufacturing waffle background in aircraft shells] // Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики. Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. 2011. Vol. 1, no 7. P. 7–8. EDN: TAOUWT. (In Russ.).
7. Mikhryutin V. V., Sherstobitov M. A. Metody mekhanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov [Methods of machining of aircraft airframe sheet skins] // Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'yeva. Bulletin of P. A. Solovyov RSATU. 2012. No. 2. P. 279–284. EDN: PPMNXB. (In Russ.).
8. Zaytsev A. M., Shachnev S. Yu., Grubyy S. V. Optimizatsiya rezhimov rezaniya pri frezerovanii karmanov obechayki s vafel'noy konstruksiyey [Optimizing machining parameters for milling pockets in waffle-grid shell structures] // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. Space Engineering and Technology. 2020. No. 3. P. 14–23. DOI: 10.33950/spacetechn-2308-7625-2020-3-14-23. (In Russ.).
9. Jalili N., Wagner J., Dadfarnia M. A piezoelectric driven ratchet actuator mechanism with application to automotive engine valves // Mechatronics. 2003. Vol. 13, no. 8. DOI: 10.1016/S0957-4158(03)00009-6. (In Engl.).

10. Zheng E., Zhou E. X. Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system // *Mechanism and Machine Theory*. 2014. Vol. 74. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015. (In Engl.).
11. Chen Y., Sun Y., Don Y. Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance // *Mechanism and Machine Theory*. 2017. Vol. 31, no. 1. P. 75–85. DOI: 10.1007/s12206-016-1209-z. (In Engl.).
12. Koser K. A slider crank mechanism based robot arm performance and dynamic analysis // *Mechanism and Machine Theory*. 2004. Vol. 39, no. 2. P. 169–182. DOI: 10.1016/S0094-114X(03)00112-5. (In Engl.).
13. Dvornikov L. T., Bol'shakov N. S. Teoriya krivoshipno-polzunnykh mekhanizmov [Theory of crank-slide mechanisms]. Novokuznetsk, 2008. 138 p. ISBN 978-5-8441-0282-0. (In Russ.).
14. Belov I. V., Semenov D. V., Belov A. A. Krivoshipno-polzunnyy mekhanizm s dvumya shatunami [Crank-slide mechanism with three connecting rods] // *Original'nyye issledovaniya. Original Research*. 2023. Vol. 13, no. 8. P. 20–27. (In Russ.).
15. Gebel E. S., Samsonov V. A. Osobennosti bifurkatsiy v ploskikh chetyrekhzvennykh mekhanizmakh [Features of bifurcations in planar four-link mechanisms] // *Vos'myye Okunevskiyechteniya. The Eighth Okunev Readings*. Saint Petersburg, 2013. P. 109–112. (In Russ.).

---

**GEBEL Elena Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Higher School of Cyberphysical Systems & Control,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 1256-0879

ORCID: 0000-0003-1811-8755

AuthorID (SCOPUS): 55574609100

ResearcherID: O-4211-2014

Correspondence address: gebel\_es@spbstu.ru

**POPOV Andrey Yuryevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Metal Cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4871-2344

ORCID: 0000-0002-7703-9283

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

Correspondence address: popov\_a\_u@list.ru

**DROZDOV Igor Nikolayevich**, Head of Workshop, JSC Federal Research and Production Center «Progress», Omsk.

Correspondence address: ceh2@progress-omsk.ru

#### For citations

Gebel E. S., Popov A. Yu., Drozdov I. N. Cutting tool feed drive of wafer background milling machine // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 21–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-21-28.

Received March 27, 2024.

© E. S. Gebel, A. Yu. Popov,

I. N. Drozdov