

А. Н. Зайцев, Р. М. Салахутдинов, Н. В. Серавкин, Н. А. Шестаков

ВЫБОР КОМПОНОВКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Рассматриваются особенности выбора компоновки электрохимических копирующе-прошивочных станков с учетом требований к жесткости и динамическим характеристикам. Приведена методика структурного отбора альтернативных вариантов компоновок по конструктивным соображениям. *Электрохимическая обработка; структурный код компоновки; рабочее пространство, критерии выбора компоновок*

Электрохимическая обработка (ЭХО) на синхронизированном с вибрацией электрода инструмента (ЭИ) импульсном токе представлена в России широким модельным рядом станков (СЭП-902, СЭП-904, СЭП-905, 4420Ф11, ET500, ET1000 и др.) и к настоящему времени имеется богатый опыт ее технологического использования. Вместе с тем в настоящее время не существует серийно выпускаемого технологического оборудования, обеспечивающего оптимальный эффект реализации данного метода по точности.

Отличительной особенностью ЭХО на импульсном токе является прерывистая бесконтактная кинематика формообразования, экстремальный характер изменения давления и плотности (из-за газонаполнения) межэлектродной среды (МС) и сверхмалые (1–10 мкм) межэлектродные зазоры (МЭЗ), необходимые для обеспечения максимальной точности копирования [1]. Последнее предъявляет повышенные требования к жесткости и динамическим характеристикам несущей системы станка, определяющей взаимное расположение ЭИ и электрода-заготовки (ЭЗ) в процессе обработки. Основные предпосылки качества несущей системы металлообрабатывающих станков закладываются на самых ранних стадиях проектирования и в первую очередь на этапе выбора компоновки, при формировании кинематической и координатной структуры, определении пропорций и системы расположения их основных узлов. Интуитивный подход к выбору компоновки или заимствование традиционных решений применительно к новым методам обработки приводит зачастую к значительным ошибкам. Практика убедительно показывает, что при создании нового, даже относительно простого станка, лишь третий или четвертый вариант его компоновочного реше-

ния начинает в известной мере удовлетворять требованиям эффективной эксплуатации, запросам серийного производства.

В рассматриваемой технологической схеме формообразование обрабатываемой поверхности детали происходит в результате копирования на заготовку рабочей части ЭИ и осуществляется относительным (со скоростью анодного растворения) движением подачи ЭИ и ЭЗ, на которое (для оптимизации теплофизических параметров и эффективной смены МС) накладывается дополнительное возвратно-поступательное движение (осцилляция) заданной частоты и амплитуды. Указанная схема допускает различное распределение движений между ЭЗ и ЭИ, а следовательно, для поиска оптимальных компоновочных решений необходим сравнительный анализ возможных вариантов.

Для структурного анализа компоновок рассматриваемых станков используется система обозначений осей координат и направлений движения станков с ЧПУ по ГОСТ 23579-79 и некоторые положения теории множеств и алгебры логики. За положительное направление оси Z принимается направление от ЭЗ к ЭИ. Дополнительное возвратно-поступательное движение, совпадающее с осью Z , обозначается W . Каждый структурный вариант компоновки состоит из двух подвижных (совершающих предусмотренные кинематической структурой координатные перемещения Z и W) и одного стационарного блока (станины), обозначаемого в структурной формуле знаком O , чем подчеркивается отсутствие движения.

В структурной формуле блок, несущий ЭЗ, записывается крайним слева с индексом «з», блок, несущий ЭИ, крайним справа с индексом «и». Общее количество структурных вариантов горизонтальных и вертикальных компоновок составляет [2]:

$$N = 2n!,$$

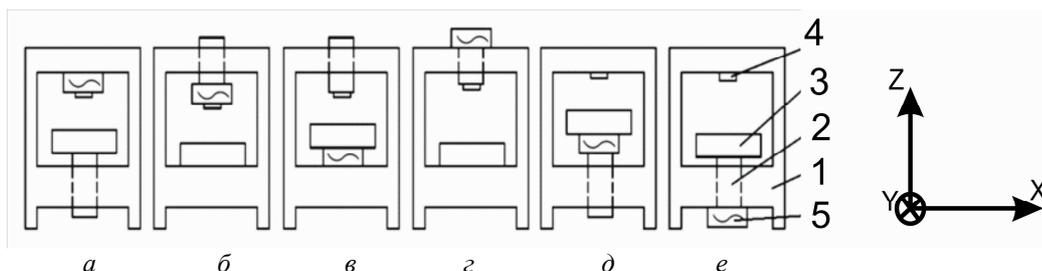


Рис. 1. Компоновка электрохимических станков (*а* – $Z_3OW_{и}$; *б* – $O_3ZW_{и}$; *в* – $W_3OZ_{и}$; *г* – $O_3WZ_{и}$; *д* – $W_3ZO_{и}$; *е* – $Z_3WO_{и}$): 1 – стационарный блок; 2 – блок подачи; 3 – стол; 4 – электрододержатель; 5 – источник колебаний

Код компоновки	$Z_3OW_{и}$	$O_3ZW_{и}$	$W_3OZ_{и}$	$O_3WZ_{и}$	$W_3ZO_{и}$	$Z_3WO_{и}$
РПЭи						
РПЭз						

Рис. 2. Матрицы форм рабочих пространств (полей) электрода инструмента (РП_{Эи}) и электрода-заготовки (РП_{Эз}) вертикальных компоновок электрохимических установок

где n – количество последовательных соединенных блоков компоновки. Для вертикальной компоновки электрохимических технологических установок количество структурных вариантов $N = 6$. На рис. 1 приведены условные изображения компоновок для портальной схемы построения базовых деталей.

Структурные формулы компоновок различаются положением знака стационарного блока «О». В двух из шести компоновок ($Z_3OW_{и}$; $W_3OZ_{и}$) подача и колебательные движения распределены в ветвях ЭИ и ЭЗ. Четыре компоновки односторонние, причем в двух компоновках ($O_3ZW_{и}$; $O_3WZ_{и}$) все координатные движения выполняют блоки ветви ЭИ, в оставшихся ($Z_3WO_{и}$; $W_3ZO_{и}$) ветви ЭЗ.

На универсальных электрохимических копировально-прошивочных станках обработка конкретной детали происходит в некоторой области рабочего пространства (РП), определяемой конфигурацией профилированной части ЭИ и глубиной обработки.

На рис. 2 применительно к случаю прошивки отверстий показаны матрицы форм рабочего пространства (поля) ЭИ и ЭЗ вертикальных компоновок. Отраженное в структурных формулах компоновок распределение движений между ЭЗ и ЭИ соответствующим образом формирует их РП. Например, если в компоновке станка $O_3ZW_{и}$ все движения реализованы в ветви инструмента, то рабочее поле неподвижной за-

готовки соответствует проекции рабочей части инструмента, а рабочее пространство ЭИ форме обрабатываемой поверхности детали. Объем РП формируется как область пересечения рабочих пространств (полей) ЭИ и ЭЗ: $РП = РП_{Эи} \cap РП_{Эз}$ в пределах, ограниченных размерами стола $B \times L$ и наибольшим расстоянием H_{max} от зеркала стола до торца электрододержателя (рис. 3, а).

Эти размеры регламентируются техническим заданием на проектирование и для станков с максимальным током источника питания $I_{max} = 300-6000$ А, могут быть ориентировочно выбраны из следующих зависимостей:

$$B = 200 + 0,1 I_{max}, \text{ мм};$$

$$H_{max} = 115 + 0,065 I_{max}; L = (1,25-1,4) B, \text{ мм}.$$

Высота РП компоновки $h_{рп}$ зависит от размеров электрода-инструмента $h_{Эи}$, длины хвостовика $h_{хв}$ и зазоров Δ , необходимых для смены инструмента:

$$h_{рп} = H_{max} - (h_{Эи} + h_{хв} + 2\Delta).$$

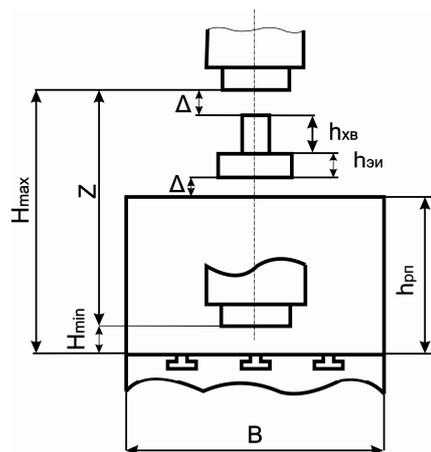
Максимальная высота РП для случая ЭХО без смены инструмента:

$$h_{рп}^{max} = H^{max} - (h_{Эи}^{min} + \Delta).$$

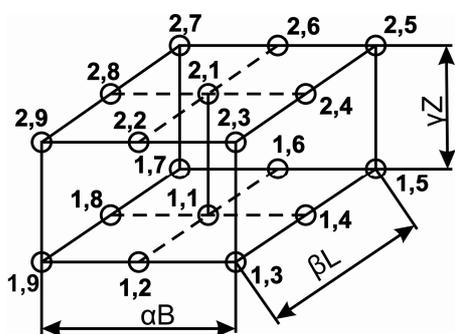
Учитывая, что величина $h_{Эи} + \Delta$ сопоставима с минимальным расстоянием от зеркала стола до торца электрододержателя H_{min} , на уровне компоновочных решений можно принять:

$$h_{рп}^{max} \approx H_{max} - H_{min} = Z,$$

где Z – наибольший ход ЭИ по координате z .



а



б

Рис. 3. К определению рабочего пространства компоновки станка:
а – размеры РП; б – расчетные точки РП

Для сравнения компоновок можно рассматривать расчетные точки РП (рис. 3, б) в зоне наиболее вероятного его использования в объеме, ограниченном размерами: $\alpha B \times \beta L \times \gamma Z$, где α, β, γ коэффициенты, определяющие долю реально используемой в процессе эксплуатации зоны РП. Понятие РП позволяет оценивать влияние компоновочных факторов на такие характеристики, относящиеся к холостым ходам и работе станка, как точность координатной установки и погрешность обработки, упругие деформации от сил тяжести ЭЗ и усилий, возникающих в процессе ЭХО, частоты собственных и вынужденных колебаний, температурные деформации.

На рис. 4 (применительно к компоновке Z_3OW_{11}) представлена расчетная схема для определения влияния податливости направляющих стола на приведенные к точкам РП смещения.

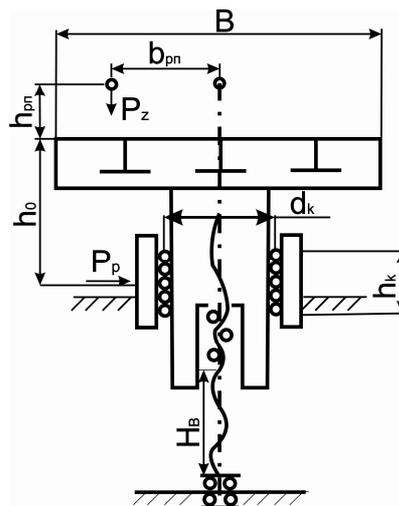


Рис. 4. Расчетная схема

Составляющая смещения в направлении координат X, Y, Z рассчитывалась для случая действия в расчетных точках единичной силы P_z :

$$\Delta x = \frac{\kappa_0 \cdot l_{рп} \cdot (h_0 + h_{рп})}{h_k^2},$$

$$\Delta y = \frac{\kappa_0 \cdot b_{рп} \cdot (h_0 + h_{рп})}{h_k^2},$$

$$\Delta z = \frac{\kappa_0 \cdot (l_{рп}^2 + b_{рп}^2)}{0,25 \cdot h_k^2},$$

где κ_0 – номинальная податливость направляющих при центральном нагружении единичной радиальной силой P_p (для шарико-шлицевых направляющих, применяемых в станках серии ЕТ в зависимости от точности изготовления, диаметра d_k и длины каретки h_k , числа шлицев и величины предварительного натяга $\kappa_0 = (1 \dots 5) \times 10^{-3}$ мкм/Н), h_0 – расстояние от зеркала стола до центра направляющих; $l_{рп}, b_{рп}, h_{рп}$ – размеры плеч и вылетов точек приложения силы (в точках РП) [2].

На рис. 5 приведены графики составляющих смещений для точек РП, размеры которого определялись исходя из привязочных компоновочных размеров $B = 400$ мм, $L = 450$ мм, $Z = 300$ мм и ограничивающих коэффициентов использования $\alpha = \beta = 0,5$; $\gamma = 0,75$.

Анализ графиков изменения величин составляющих смещений в различных точках РП показывает, что в случаях внецентренного приложения единичной силы моменты $P_z \cdot l_{рп}$; $P_z \cdot b_{рп}$, опрокидывающие направляющую каретку стола, вызывают заметные радиальные смещения ΔX и ΔY , величины которых находятся в прямой зависимости от компоновочных размеров d_k и h_k, h_0 и $h_{рп}$.

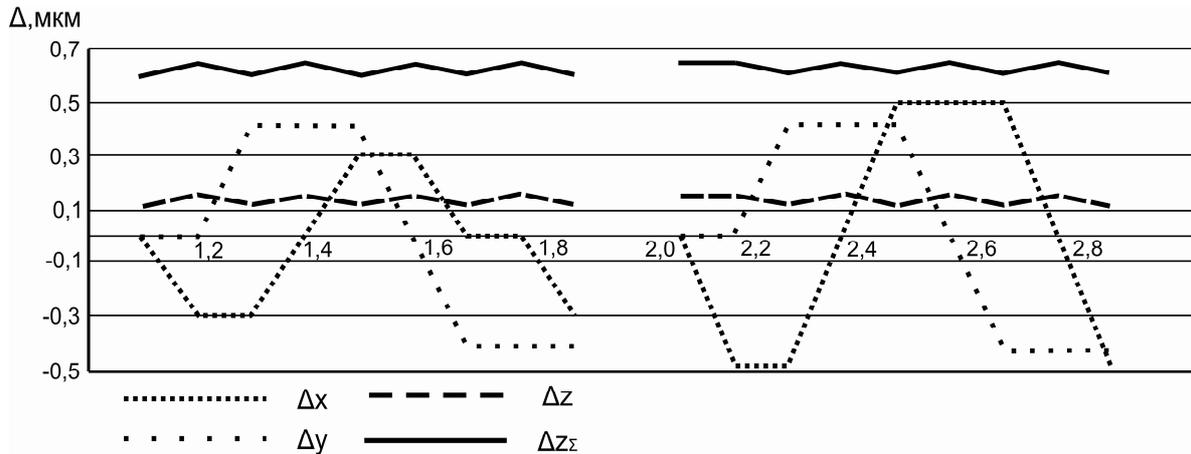


Рис. 5. Графики смещений для точек РП

Влияние компоновочных факторов на величину и разброс составляющих смещений в направлении оси Z незначительно, а суммарная деформация привода подач ΔZ_{Σ} (см. график на рис. 5) в наибольшей мере связана с податливостью деформируемой длины ходового винта, его опор и гайки.

Для сравнения уровня влияния податливости направляющих привода подач различных компоновок (табл. 1) были рассчитаны наибольшие (Δ_{\max}) и средние ($\Delta_{\text{ср}}$) величины смещений, а в качестве характеристики разброса среднеквадратичные отклонения (σ_{Δ}) и коэффициент вариации (ν_{Δ}):

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot \sum \Delta_i,$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (\Delta_i - \Delta_{\text{ср}})^2},$$

$$\nu_{\Delta} = \frac{\sigma_{\Delta}}{\Delta_{\text{ср}}},$$

где $\Delta_i = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2}$ – суммарное смещение в расчетной точке РП; n – число расчетных точек.

Данные табл. 1 показывают, что при применении одного типоразмера направляющих и прочих равных условиях влияние податливости на обобщающие характеристики расчетных точек РП Δ_{\max} , $\Delta_{\text{ср}}$ зависит от компоновочного размера h_0 , который определяет вылет точки РП над центром направляющей каретки.

Условию минимального вылета h_0 удовлетворяют компоновки (Z_3OW_{II} , Z_3WO_{II} , W_3OZ_{II} , O_3WZ_{II}), в которых подвижная пиноль шарикошлицевых направляющих непосредственно примыкает к элементам конструкции станка (стол и электродержатель), несущим ЭЗ или ЭИ.

Расчеты динамических характеристик, выполняемых на этапе выбора компоновочных решений, из-за ограниченности исходных сведений не преследуют цель получения полной картины колебаний несущей системы, а сводятся к анализу влияния компоновочных факторов на свойства характерных для данного вида станков частных колебательных систем и в первую очередь на характеристики источников колебаний.

Таблица 1

Компоновка	Z_3OW_{II}	O_3ZW_{II}	W_3OZ_{II}	O_3WZ_{II}	W_3ZO_{II}	Z_3WO_{II}
$\Delta_{\max}, \text{мкм} \cdot 10^{-2}$	0,65	0,81	0,67	0,67	0,83	0,65
$\Delta_{\text{ср}}, \text{мкм} \cdot 10^{-2}$	0,55	0,69	0,57	0,57	0,71	0,55
$\sigma_{\Delta}, \text{мкм} \cdot 10^{-2}$	0,29	0,35	0,30	0,30	0,36	0,29
ν_{Δ}	0,53	0,51	0,53	0,53	0,51	0,53

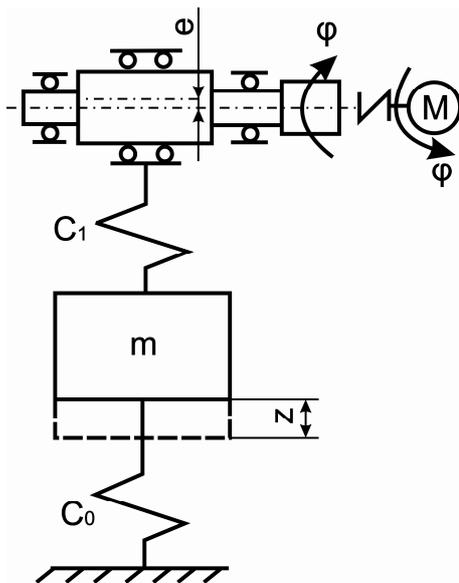


Рис. 6. Динамическая модель вибратора

Уравнение движения динамической системы эксцентрикового электромеханического вибратора (рис. 6) можно представить в виде:

$$m \cdot \ddot{z} + c_1(z - e \cdot \sin \varphi) + (\beta_1 + \beta_0)z + (c_1 + c_0)z = 0,$$

c_1, β_1 – жесткость и коэффициент демпфирования упругой связи эксцентрикового вала с электродержателем; e, φ – эксцентриситет вала вибратора и угол его поворота, e, φ – эксцентриситет вала вибратора и угол его поворота.

Динамика вращения ротора электродвигателя описывается уравнением:

$$J \cdot \ddot{\varphi} - M_c(\varphi) - c_1 e(z - e \cdot \sin \varphi) - M_g(\varphi) = 0,$$

где J – приведенный к валу двигателя момент инерции вращающихся частей; $M_g(\varphi), M_c(\varphi)$ – моментная характеристика двигателя и сил сопротивления вращению, соответственно.

В первом приближении колебания вибратора, обеспечивающие изменение промывочного МЭЗ (S_n) на частоте ω и сдвиг фаз $\Delta\varphi$, определяются из соотношений:

$$S_n = \frac{c_1 \cdot e}{\sqrt{(c - m \cdot \omega^2)^2 + \beta^2 \cdot \omega^2}},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\beta \cdot \omega}{c - m \cdot \omega^2}.$$

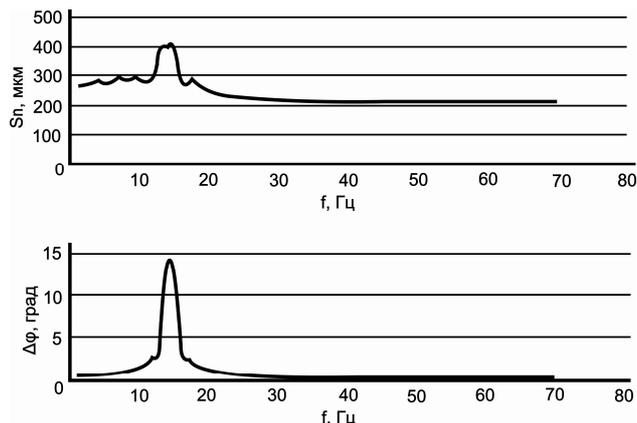


Рис. 7. Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики

Условием устойчивости является динамическое равновесие моментов:

$$M_g - M_c - \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \omega \cdot S_n^2 = 0.$$

На рис. 7 показаны амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики вибратора станка, компоновка которого соответствует коду W_3ZO_u . Низкая частота собственных колебаний системы, связанная со значительной массой колеблющегося стола, обуславливает необходимость перехода на рабочую частоту через резонанс. Если величина момента сопротивления M_c сравнима с движущим моментом M_g , то при достаточно остром резонансном пике динамическое равновесие моментов, действующих на вал двигателя, может быть нарушено и последует срыв колебаний.

В общем случае для обеспечения стационарных колебаний потребуется высокая мощность двигателя привода вибратора. Кроме того, если рабочая частота является околорезонансной, колебания системы оказываются неустойчивыми. Именно поэтому применение эксцентриковых электромеханических вибраторов для возбуждения колебаний стола с ЭЗ в практике проектирования станков не нашло широкого применения.

Условия структурного отбора компоновок, основанные на конструктивных соображениях применительно к электрохимическим станкам, разнообразны по своему составу (табл. 2). Для определения соответствия той или иной компоновки принятым условиям отбора введены следующие ранги и численные значения (табл. 3) критериев оценки соответствия (предпочтительности) [3]:

Таблица 2

Условия отбора компоновок		Код компоновки					
		Z_3OW_{II}	O_3ZW_{II}	W_3OZ_{II}	O_3WZ_{II}	W_3ZO_{II}	Z_3WO_{II}
		K_i					
1. Влияние подвижных (колеблющихся) масс	Z	0,7	1	0,37	1	0,3	0,25
	W	0,9	0,65	0,37	0,63	0,2	0,15
2. Удобство размещения рабочей камеры		0,63	0,8	0,37	0,8	0,25	0,37
3. Токоподвод	ЭЗ	0,6	0,8	0,37	0,8	0,23	0,3
	ЭИ	0,4	0,25	0,45	0,25	0,8	0,8
4. Гальваническая развязка стола		0,5	0,75	0,3	0,75	0,23	0,37
5. Соблюдение принципа Аббе		0,7	0,6	0,8	0,3	0,37	0,2
Обобщенный критерий предпочтительности, K_0		0,63	0,65	0,41	0,58	0,3	0,31

Таблица 3

Ранг соответствия	Диапазон значений критериев соответствия (K_i)
Очень хорошее	1–0,8
Хорошее	0,8–0,63
Удовлетворительное	0,63–0,37
Плохое	0,37–0,2
Очень плохое	0,2–0

Обобщенный критерий предпочтительности компоновки вычисляется по формуле:

$$K_0 = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n K_i},$$

где K_i – численное значение частного критерия соответствия компоновки условиям отбора по конструктивным соображениям, n количество частных критериев, сводимых в обобщенный.

Результаты расчетов показывают, что лишь первая (Z_3OW_{II}) и вторая (O_3ZW_{II}) компоновки находятся в диапазоне обобщенного критерия, соответствующего рангу «хорошо», третья (W_3OZ_{II}) и четвертая (O_3WZ_{II}) – рангу «удовлетворительно», а компоновки с неподвижным ЭИ (W_3ZO_{II} и Z_3WO_{II}) по конструктивным ограничениям соответствуют рангу «плохо».

Приведенная методика структурного отбора компоновок была использована при проектировании электрохимических станков, выпускаемых компанией ООО «ЕСМ». Компоновка, в которой вибратор не является конечным блоком, была реализована на основе кинематической структуры (рис. 8) с суммирующим механизмом. В опытном образце станка, код компоновки которого O_3WZ_{II} , подача и возвратно-

поступательное движение несущей ЭИ пиноли осуществлялись с помощью шарико-винтовой пары, приводимой от двух электродвигателей. Первый (M1) в приводе винта обеспечивает заданную подачу, а второй (M2) с помощью кривошипно-шатунного механизма возбуждает крутильные колебания гайки и соответственно колебательные движения ЭИ.

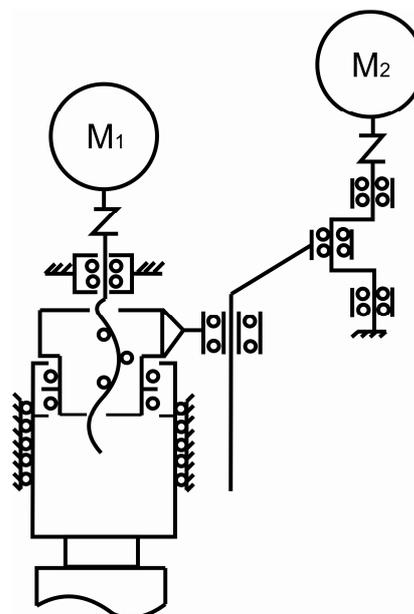


Рис. 8. Кинематическая схема компоновочного решения O_3WZ_{II}

Основным достоинством вибратора на основе суммирующего механизма является возможность получения большого размаха колебаний МЭЗ, что для электрохимической обработки на больших площадях является необходимым условием эффективной смены МС. Недостаток схемы — значительные динамические нагрузки на шарико-винтовую пару и, соответственно, низкий ресурс и потеря точности привода. В лабораторных условиях были созданы и испытаны экспериментальные образцы и других компоновочных решений рассматриваемых станков.

В настольном станке ЕТ-500 [4], компоновка которого отвечает структурной формуле O_3ZW_u , подача и колебательное движение сосредоточены в ветви ЭИ.

В станках моделей ЕТ-1000, ЕТ-3000 (компоновка Z_3OW_u) подача стола с ЭЗ дополняется колебаниями ЭИ с амплитудой 0,1–0,2 мм на частоте порядка 50 Гц, создаваемыми эксцентриковым электромеханическим вибратором [5].

Эксплуатация вышеперечисленных станков показала эффективность принятых компоновочных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. **Житников В. П., Зайцев А. Н.** Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.
2. **Врагов Ю. Д.** Анализ компоновок металло-режущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 180 с.
3. **Harrington E. C.** Industrial quality control, 1965. 21 № 10.
4. **Зайцев А. Н., Салахутдинов Р. М.** Станок электрохимический. Патент 69654(RU). Опубл. 16.03.2009
5. **Зайцев А. Н., Салахутдинов Р. М.** Станок электрохимический. Патент 69651(RU). Опубл. 16.03.2009.

ОБ АВТОРАХ

СВЕДЕНИЙ НЕТ!