

Кухарь Максим Вадимович, магистрант, НИУ МИЭТ, г. Москва

Разживалов Павел Николаевич, доцент института Нано- и микросистемной техники, НИУ МИЭТ, г. Москва

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ГРУППОВОЙ УСТАНОВКИ ШАРИКОВ ПРИПОЯ И ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЁТОВ ТОЧНОСТИ ЕГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Аннотация

В статье рассматривается лабораторный стенд для проведения опытов по групповому монтажу шариков припоя и отработки конструктивных решений для оборудования по данной технологии. Описана разработанная для него конструкция, которая включает в себя 4 основные составные части, а именно: привод оси x, передвижной столик, зона флюсования и зона установки шариков припоя. Для составляющих частей также были рассмотрены основные особенности их конструкции. Также были выведены формулы для расчёта точности позиционирования линейных приводов стенда и погрешностей их вычисления. С помощью данных формул были проведены расчёты точности позиционирования и погрешностей вычислений.

Annotation

The article discusses a laboratory stand for conducting experiments on the solderball placement and working out design solutions for equipment using this technology. The design developed for it is described, which includes 4 main components, namely: an x-axis drive, a movable table, a flux zone and a solder ball placement zone. For the component parts, the main features of their design were also considered. Formulas for calculating the positioning accuracy of the linear actuators of the stand and the errors in their calculation were also derived. Using these

formulas, calculations of the positioning accuracy and subtraction errors were carried out.

Ключевые слова: групповой монтаж шариков припоя, стенд для отработки технологии, установка припойных шариков на уровне пластины, точность позиционирования

Keywords: solderball placement, stand for conducting experiments on the technology, Wafer Level Solder Ball Placement, positioning accuracy

В настоящий момент для проведения опытов по технологии группового монтажа шариков припоя требуется лабораторный стенд, который также позволит и отработать конструктивные решения в оборудовании для реализации данной технологии. Ранее для данного стенда был произведён первичный подбор комплектующих [1], а в данной статье будет описана конструкция этого стенда и проведены расчёты точности позиционирования его линейных приводов.

Стенд должен реализовывать установку шариков припоя по разновидности Wafer Level Solder Ball Placement – установка припойных шариков на уровне пластины [1 – 3], а именно наносить флюс и устанавливать шарики припоя на контактные площадки пластины диаметром не менее 100 мм и подложки размером не менее 60×100 мм. При этом устанавливаемые шарики припоя должны иметь диаметр от 200 до 760 мкм, а точность установки шариков должна быть не более ± 25 мкм [1]. Необходимо отметить, что точность установки шариков припоя можно определить только экспериментально, поэтому в техническое задание (ТЗ) на стенд для возможности теоретического расчёта внедрён параметр точности позиционирования осей. В итоге принято решение, что точность позиционирования по горизонтальным линейным осям перемещения x и y должна быть не более ± 4 мкм по каждой оси, а точность позиционирования по вертикальной линейной оси перемещения z должна быть не более ± 2 мкм.

Разработанная конструкция стенда делится на следующие основные составляющие (см. Рисунок 1):

- Привод оси x ;
- Передвижной столик;
- Зона флюсования;
- Зона установки шариков припоя.

Рассмотрим каждый из узлов более подробно. Привод оси x (см. Рисунок 2) состоит из двух линейных приводов оси x , основания и детали-полки, на которую устанавливается передвижной столик. Каждый линейный привод оси x состоит из покупного комплекта шарико-винтовой передачи (ШВП), кареток, рельсов, конструкционного профиля для станка, шагового двигателя, а также кронштейна собственной разработки для крепления двигателя к профилю. Принято решение использовать два линейных привода в сборке привода оси x . Причина данного решения связана с тем, что устанавливаемый на данные привода передвижной столик существенно шире, чем один линейный привод и в случае применения одного привода конструкция будет менее сбалансированной, нагрузка на один привод будет выше, а удалённые боковые области передвижного столика будут сильнее прогибаться. По этой же причине в каждом линейном приводе применено по четыре, а не по две рельсовых каретки, которые вместе с модулем крепления гайки ШВП увеличивают количество поверхностей контакта привода. Т. к. каждый линейный привод имеет в своём составе по собственному шаговому двигателю, принято решение, что их управление будет синхронизировано, чтобы не допустить сдвига по оси x подвижных частей одного линейного привода относительно подвижных частей другого линейного привода. При этом управление каждым двигателем будет осуществляться своим собственным драйвером, для снижения нагрузки на управляющую электронику, но на каждый из двух драйверов, отвечающих за движение по одной оси, будут подаваться одинаковые управляющие сигналы.

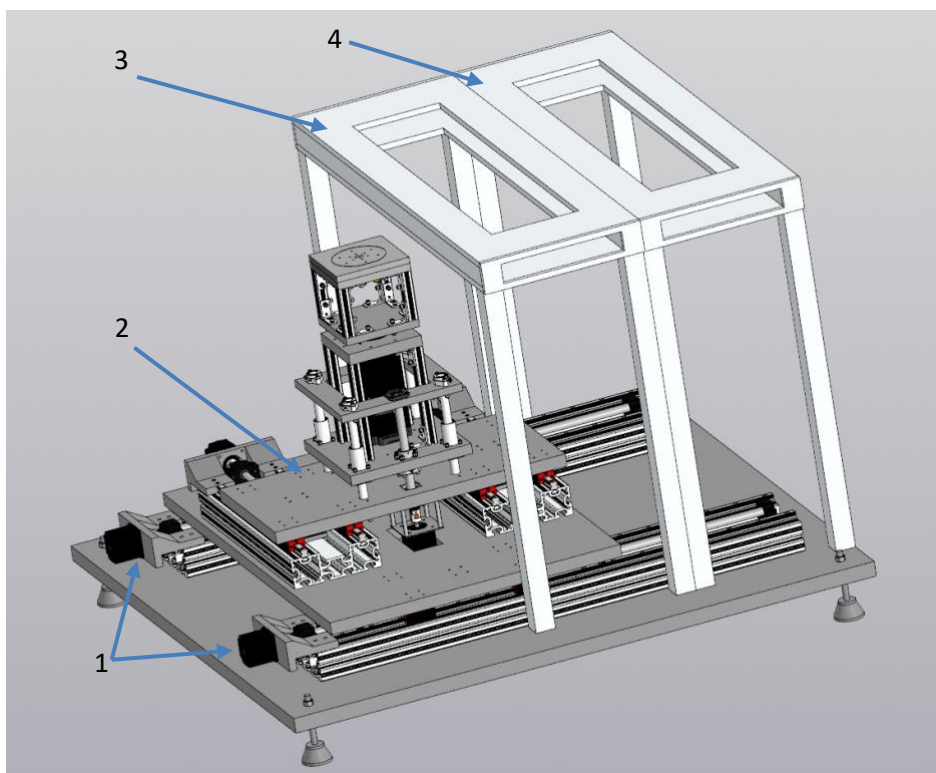


Рисунок 1 – Стенд для установки шариков припоя:

1 – привод оси x; 2 – передвижной столик; 3 – зона флюсования; 4 – зона установки шариков припоя

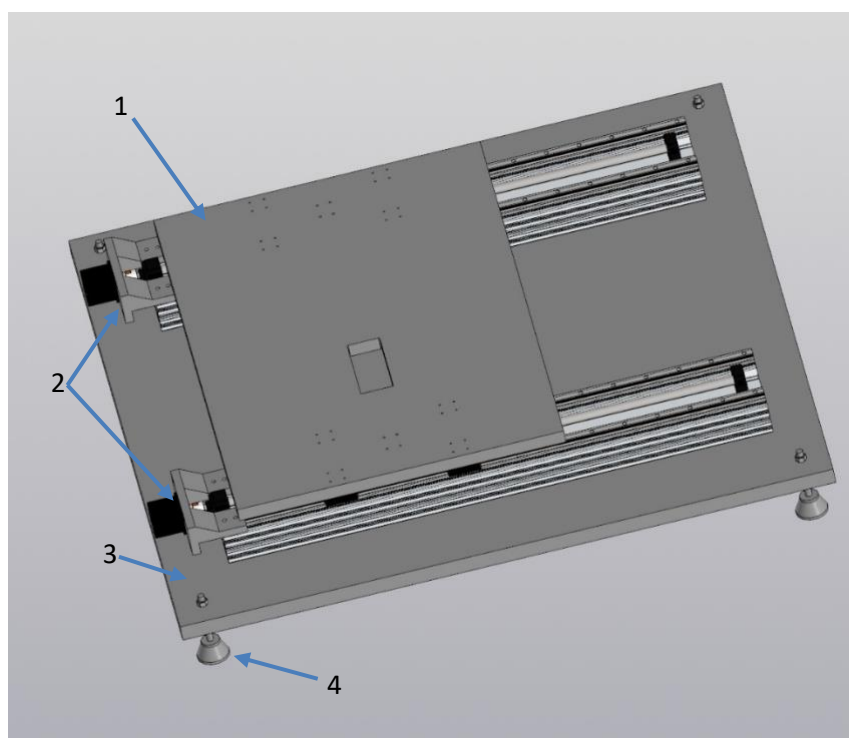


Рисунок 2 – Привод оси x: 1 – Полка; 2 – Линейный привод;
3 – Основание; 4 – Регулируемая ножка

Передвижной столик (см. Рисунок 3) передвигается по приводу оси x, на нём осуществляется перемещение пластины в зоны флюсования и установки шариков припоя, а сам столик выполняет подъём пластины к трафаретам в этих областях, их совмещение с трафаретами, и опускание пластины вниз после проведения операций. Для этого он имеет возможность движения по линейным осям y и z с помощью шаговых двигателей, ШВП и линейных направляющих, также возможность вращения вокруг полярной оси θ с помощью шагового двигателя и планетарного редуктора. Также данный столик осуществляет фиксацию пластины во время перемещений при помощи вакуумной платформы, на которой непосредственно размещается и фиксируется кремниевая пластина во время перемещений (см. Рисунок 4).

Участки флюсования и установки шариков представляют собой две одинаковые опоры для специальных сменных трафаретов. Данные опоры являются сварными конструкциями из нескольких пластин и профильных труб.

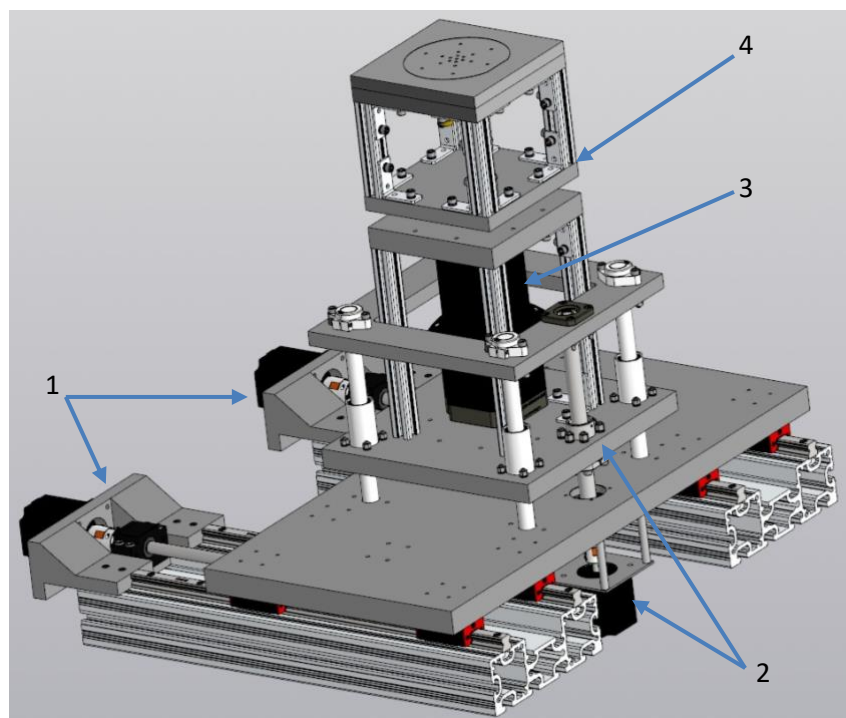


Рисунок 3 – Передвижной столик:

1 – привод оси у; 2 – привод оси z; 3 – привод полярной оси θ ; 4 – вакуумная платформа

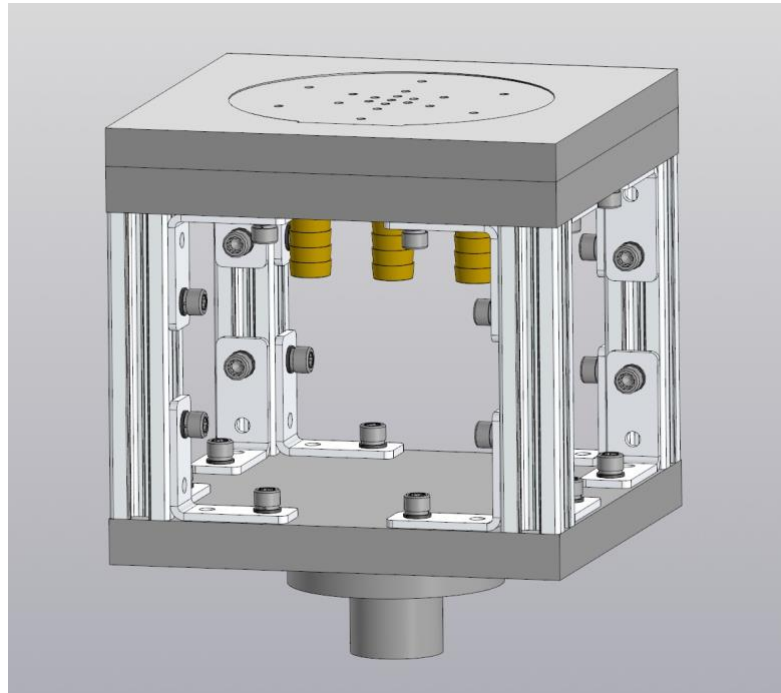


Рисунок 4 – Вакуумная платформа

Далее для разработанной конструкции были проведены расчёты точности позиционирования линейных приводов осей стенда и их погрешностей вычисления.

Согласно техническому заданию (ТЗ), линейные приводы горизонтальных осей перемещения стенда должны иметь точность позиционирования не более 4 мкм, а линейный привод вертикальной оси перемещения – не более 2 мкм.

В приводах линейных осей применяются ШВП и шаговые двигатели, поэтому угловой шаг шагового двигателя вычисляется следующим образом [4]:

$$E = \frac{360 \times Si}{p_1}, \quad (1)$$

где E – угловой шаг, град, S – точность позиционирования ШВП без дробления шага, p_1 – ход резьбы винта ШВП, i – передаточное отношение, которое равно значению передаточного отношения передаточного механизма, находящегося между двигателем и ШВП.

Шаг винта можно определить по формуле [5]:

$$p_1 = pn, \quad (2)$$

где p – шаг резьбы, n – количество заходов резьбы.

Подставив формулу (2) в формулу (1), получим:

$$E = \frac{360^\circ \times Si}{pn} \quad (3)$$

Преобразуем формулу (3) и получим точность позиционирования ШВП без дробления шага:

$$S = \frac{Epn}{360^\circ \times i} \quad (4)$$

Подставим в данное выражение числовые характеристики ШВП SFU1605 и шаговых двигателей, используемых в линейных привода. ШВП SFU1605 имеет шаг резьбы $p = 5$ мм, количество заходов резьбы $n = 1$ [6 – 8].

В приводе оси x применяется шаговый двигатель 57HS115-4204-001A с угловым шагом $E = 1,8^\circ$ [10], между двигателем и ШВП нет никаких передаточных механизмов, поэтому $i = 1$ [4]. Для данного привода получаем:

$$S = \frac{1,8^\circ \times 5 \text{ мм} \times 1}{360^\circ \times 1} = 0,025 \text{ мм} = 25 \text{ мкм}$$

В приводе оси y применяется шаговый двигатель 57HS76-3004 с угловым шагом $E = 1,8^\circ$ [10], между двигателем и ШВП нет никаких передаточных механизмов, поэтому аналогично $i = 1$ [4]. Для данного привода также получаем:

$$S = \frac{1,8^\circ \times 5 \text{ мм} \times 1}{360^\circ \times 1} = 0,025 \text{ мм} = 25 \text{ мкм}$$

В приводе оси z применяется шаговый двигатель PL130H280-D19N с угловым шагом $E = 1,8^\circ$ [11], между двигателем и ШВП установлен планетарный редуктор 115VRB10K-S32-P0, поэтому $i = 10$ [4, 12]. Для данного привода также получаем:

$$S = \frac{1,8^\circ \times 5 \text{ мм} \times 1}{360^\circ \times 10} = 0,025 \text{ мм} = 2,5 \text{ мкм}$$

Очевидно, что значения для всех осей превышают допустимые требования к точности позиционирования по ТЗ, и без применения дополнительных программно-аппаратных средств данные передачи не обеспечат необходимой точности.

Но для управления шаговыми двигателями в стенде применяются одноканальные драйверы Leadshine DM442, которые имеют 16 ступеней деления шага от 1:2 до 1:128 [13]. Они также позволяют делить угловой шаг двигателя, и в данной ситуации так же применима следующая формула [14]:

$$\vartheta = \frac{NMi}{p_1}, \quad (5)$$

где ϑ – количество шагов на миллиметр, N – количество полных шагов двигателя на один оборот, M – коэффициент микрошагового дробления, задаваемый программно на драйвере, а p_1 и i аналогично формуле (1), это ход резьбы винта ШВП и передаточное отношение, которое равно значению передаточного отношения передаточного механизма, находящегося между двигателем и ШВП, соответственно.

Количество полных шагов двигателя на один оборот равно:

$$N = \frac{360^\circ}{E}, \quad (6)$$

где E – аналогично формулам (1), (3), (4) – это угловой шаг, измеряемый в градусах. Подставим выражения (2) и (6) в формулу (5) и получим:

$$\vartheta = \frac{360^\circ \times Mi}{E p_1} \quad (7)$$

Очевидно, что величину количества шагов на миллиметр можно представить и иным образом, а именно:

$$\vartheta = \frac{1 \text{ мм}}{S_{\text{дроб}}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{дроб}}$ – точность позиционирования ШВП с применением дробления шага, в мм. а после подстановки формулы (7) в формулу (8), выражение преобразуется в вид:

$$\frac{1 \text{ мм}}{S_{\text{дроб}}} = \frac{360^\circ \times Mi}{Epn} \quad (9)$$

Далее преобразуем формулу (9) и получим, что точность позиционирования ШВП с применением дробления шага вычисляется следующим образом:

$$S_{\text{дроб}} = \frac{Epn \times \text{мм}/^\circ}{360Mi} \quad (10)$$

Стоит отметить, что данные вычисления производятся с определённой погрешностью, которую так же необходимо вычислить для определения достоверности результата. В случае применения шагового двигателя, как отмечается в источнике [15], при использовании реальная точность позиционирования имеет ограничения, связанные с механическими допусками в конструкции двигателя, и в итоге типовая погрешность равна 3 – 5% от угла полного шага. Поскольку нам не известны точные данные погрешности угла поворота, которую имеют шаговые двигатели 57HS115-4204-001A и 57HS76-3004, применяемых в приводах осей x и y, предположим, что она наихудшая, т. е. 5 %. Погрешность угла поворота для шагового двигателя PL130H280-D19N известна и равна 5% [11]. В результате получаем, что погрешность угла поворота для всех трёх двигателей равна:

$$\Delta\varphi_{\text{двиг}} = 0,05E = 0,05 \times 1,8^\circ = 0,09^\circ \quad (11)$$

По формуле (26) вычислим погрешность точности позиционирования и получим для приводов осей x и y:

$$\Delta S = \frac{0,09^\circ \times 5 \text{ мм} \times 1}{360^\circ \times 1} = 1,25 \times 10^{-3} \text{ мм} = 1,25 \text{ мкм}$$

Погрешность точности позиционирования привода оси z включает в себя ещё и погрешность, возникающую из-за люфта выходного вала планетарного редуктора, установленного между двигателем и ШВП. Поэтому общая погрешность угла поворота для привода оси z вычисляется следующим образом:

$$\Delta\varphi_z = \Delta\varphi_{\text{двиг}} + \Delta\varphi_{\text{пл}}, \quad (12)$$

где $\Delta\varphi_{\text{пл}}$ – люфт планетарного редуктора, град.

Люфт выходного вала планетарного редуктора является справочной характеристикой, и для применяемого в конструкции привода оси z планетарного редуктора 115VRB10K-S32-P0 он имеет значение $\Delta\varphi_{пл} = 1' \approx 0,017^\circ$ [12]. Тогда по формуле (12) общая погрешность угла поворота привода оси z:

$$\Delta\varphi_z = 0,09^\circ + 0,017^\circ = 0,107^\circ$$

Тогда общая погрешность расчёта точности позиционирования для привода оси z по формуле (11) равна:

$$\Delta S = \frac{0,107^\circ \times 5 \text{ мм} \times 1}{360^\circ \times 10} \approx 1,49 \times 10^{-4} \text{ мм} = 0,149 \text{ мкм}$$

Теперь вычислим точность позиционирования с помощью дробления шага для всех возможных значений коэффициента микрошагового дробления, которые позволяет реализовать драйвер Leadshine DM442 [11] и оценим их достоверность. Результаты данных вычислений приведены вместе в таблицу.

Таблица – Результаты вычисления точности позиционирования при использовании разных коэффициентов микрошагового дробления и их погрешность для приводов линейных осей перемещения станда

Коэффициент микрошагового дробления M	Точность позиционирования ШВП с применением дробления шага по осям x и y $S_{\text{дроб_xy}}$, мкм	Погрешность точности позиционирования ΔS_{xy} , мкм	Точность позиционирования ШВП с применением дробления шага по осям x и y $S_{\text{дроб_z}}$, мкм	Погрешность точности позиционирования ΔS_z , мкм
2	6,25	$\pm 1,25$	0,625	$\pm 0,149$
4	3,125		0,3125	
8	1,5625		0,15625	

16	0,78125		0,078125	
32	0,390625		0,0390625	
64	0,1953125		0,01953125	
128	0,09765625		0,009765625	
5	2,5		0,25	
10	1,25		0,125	
20	0,625		0,0625	
25	0,5		0,05	
40	0,3125		0,03125	
50	0,25		0,025	
100	0,125		0,0125	
125	0,1		0,01	

Как можно видеть, для приводов осей x и y достоверными вычисления точности позиционирования можно считать только для коэффициентов микрошагового дробления 2, 4, и 5 и 10, когда погрешность вычисления не превышает половину точности позиционирования. Для привода оси z достоверными можно считать вычисления для коэффициентов микрошагового дробления 2 и 4. Из данных достоверных вычислений требованиям ТЗ по точности позиционирования линейных приводов горизонтальных осей ± 4 мкм удовлетворяет только одно значение коэффициента микрошагового дробления, равное 5 и которому соответствуют значения точности позиционирования 2,5 мкм. Для вертикальной оси перемещения требования точности позиционирования удовлетворяют оба значения микрошага 2 и 4, которым соответствуют точности позиционирования 0,625 мкм и 0,3125 мкм. Это значит, что ТЗ по точности позиционирования приводов линейных осей стенда успешно реализовано.

В итоге была разработана конструкция лабораторного стенда для проведения лабораторных опытов по групповому монтажу шариков припоя и проведён расчёт точности позиционирования приводов его линейных осей,

подтвердивший, что она соответствует требованиям ТЗ на стенд. В дальнейшем планируется получение гранта для проведения исследований по групповому монтажу шариков припоя, на средства которого в т. ч. будут закуплены комплектующие и изготовлены детали и сборочные единицы для данного стенда. Результаты, полученные на данном стенде, планируется применить при разработке мелкосерийной групповой технологии монтажа шариков припоя и конструировании опытных версий оборудования для её реализации.

Список литературы

1. Кухарь М. В. Определение наиболее подходящей технологии группового монтажа шариков припоя с целью отработки на стендовом оборудовании / М. В. Кухарь, П. Н. Разживалов // НАНОИНДУСТРИЯ. Спецвыпуск, 2026
2. Lim S.P.S., Jaafar N., Chong S.C., Lim S.S.H., Chai T.C. Development of wafer level solderball placement process for RDL-first FOWLP // 2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2020. — Pp. 435–439.
3. Jaafar N.B., Choong C.S., Siang S.L.P., Chong C.T. Comprehensive Study on Thermal Aging and Ball Shear Characterization of SAC-X Solders // 2021 IEEE 23rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2021. — Pp. 430–434.
4. Шарико-винтовая передача. ТНК общий каталог. [Электронный ресурс]. — URL: https://thk.ru/cataloguespdf/501RU_15_BallScrew.pdf (дата обращения: 01.06.2026).
5. Иванов, М. Н. Детали машин : учебник для вузов / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. — 16-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 457 с.
6. Комплект ШВП sfu1605-1000mm+BKBF12+DSG16H+D25L30 8*10 [Электронный ресурс]. — URL:

- https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shariko_vintovye_peredachi_shvp/komplekty_shvp/14825/ (дата обращения: 01.06.2026).
7. Комплект ШВП sfu1605-500mm+BKBF12+DSG16H+D25L30 8*10 [Электронный ресурс]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shariko_vintovye_peredachi_shvp/komplekty_shvp/14827/ (дата обращения: 01.06.2026).
8. Винт+ гайка SFNUR1605-A1-F250-184.5-C7 [Электронный ресурс]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shariko_vintovye_peredachi_shvp/komplekty_shvp/14637/ (дата обращения: 01.06.2026).
9. Шаговый двигатель 57HS115-4204-001A [Электронный ресурс]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shagovye_dvigateli_i_i_aksessuary/shagovye_dvigateli/13788/?type=search&source=yandex.ru&added=no&block=dynamic_places&pos=1&device=desktop®ion=region_name%7CМосква%7Cregion_id%7C213&etext&utm_source=ya.direct&utm_medium=cpc&utm_campaign=ps_dinamika_64596423&utm_content=gid%7C4657449364%7Cad_id%7C1873955786717470106%7Cphrase_id%7C53239286420&direct.yandex.ru;0;0;yandex.ru:premium (дата обращения: 01.06.2026).
10. Шаговый двигатель 57HS76-3004 [Электронный ресурс]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shagovye_dvigateli_i_i_aksessuary/shagovye_dvigateli/952/?type=search&utm_source=ya.direct&utm_medium=cpc&utm_campaign=ps_dinamika_64596423&utm_content=gid%7C4657449364%7Cad_id%7C1873955786717470106%7Cphrase_id%7C53239286420&source=yandex.ru&added=no&block=dynamic_places&pos=3&device=desktop®ion=region_name%7CМосква%7Cregion_id%7C213&yclid=5458907567149285375 (дата обращения: 01.06.2026).
11. Двигатель шаговый биполярный PL130H280-D19N [Электронный ресурс]. — URL: https://purelogic.ru/catalog/dvigatel_shagovyy_bipolyarnyy_pl130h280-d19n/?ysclid=mq6pzqxxvv559225277 (дата обращения: 01.06.2026).

12. Редуктор планетарный прецизионный 115VRB10K-S32-P0 [Электронный ресурс]. — URL: https://purelogic.ru/catalog/reduktor_planetarnyy_precizionnyy_115vrb10k-s32-p0/?ysclid=mq6q074rf7140316181 (дата обращения: 01.06.2026).
13. Одноканальный драйвер Leadshine DM442 [Электронный ресурс]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/drayvery_shagovykh_dvigatelay/odnokanalnye_drayvery_shagovykh_dvigatelay/2139/ (дата обращения: 01.06.2026).
14. Расчёт steps/mm для ШВП в GRBL, Mach3 и LinuxCNC: формула, примеры и калибровка [Электронный ресурс]. — URL: <https://shvp-inner.ru/blog/raschet-steps-mm-dlya-shvp-v-grbl-mach3-i-linuxcnc.html> (дата обращения: 01.06.2026).
15. Шаговый двигатель принцип [Электронный ресурс]. — URL: <https://inner.su/articles/shagovyy-dvigatel-printsip/> (дата обращения: 01.06.2026).

References

1. Kukhar M.V. Selection of a technology for placing solder balls on the stand and determination of the stand's key characteristics / M.V. Kukhar, P.N. Razzhivalov // NANOINDUSTRY. Special issue, 2026.
2. Lim S.P.S., Jaafar N., Chong S.C., Lim S.S.H., Chai T.C. Development of wafer level solderball placement process for RDL-first FOWLP // 2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2020. — Pp. 435–439.
3. Jaafar N.B., Choong C.S., Siang S.L.P., Chong C.T. Comprehensive Study on Thermal Aging and Ball Shear Characterization of SAC-X Solders // 2021 IEEE 23rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2021. — Pp. 430–434.

4. Ball-screw transmission. TNK's general catalog. [electronic resource]. — URL: https://thk.ru/cataloguespdf/501RU_15_BallScrew.pdf (date of reference: 06/01/2026).
5. Ivanov, M. N. Machine parts : a textbook for universities / M. N. Ivanov, V. A. Finogenov. — 16th ed., ispr. and add. Moscow : Yurait Publishing House, 2025. 457 p.
6. Ball screw set sfu1605-1000mm+BKBF12+DSG16H+D25L30 8*10 [Electronic resource]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shariko_vintovye_peredachi_shvp/komplekty_shvp/14825/ (date of access: 06/01/2026).
7. Ball screw set sfu1605-500mm+BKBF12+DSG16H+D25L30 8*10 [Electronic resource]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shariko_vintovye_peredachi_shvp/komplekty_shvp/14827/ (date of reference: 06/01/2026).
8. Screw+ nut SFNUR1605-A1-F250-184.5-C7 [Electronic resource]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shariko_vintovye_peredachi_shvp/komplekty_shvp/14637/ (date of access: 06/01/2026).
9. 57HS115-4204-001A stepper motor [Electronic resource]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shagovye_dvigateli_i_i_aksessuary/shagovye_dvigateli/13788/?type=search&source=yandex.ru&added=no&block=dynamic_places&pos=1&device=desktop®ion=region_name%7CMockBa%7Cregion_id%7C213&etext&utm_source=ya.direct&utm_medium=cpc&utm_campaign=ps_dinamika_64596423&utm_content=gid%7C4657449364%7Cad_id%7C1873955786717470106%7Cphrase_id%7C53239286420&direct.yandex.ru;0;0;yandex.ru:premium (accessed: 06/01/2026).
10. 57HS76-3004 stepper motor [Electronic resource]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/shagovye_dvigateli_i_i_aksessuary/shagovye_dvigateli/952/?type=search&utm_source=ya.direct&utm_medium=cpc&utm_campaign=ps_dinamika_64596423&utm_content=gid%7C4657449364%7Cad_id%7C1873955786717470106%7Cphrase_id%7C532392

86420&source=yandex.ru&added=no&block=dynamic_places&pos=3&device=desktop®ion=region_name%7moscow%7Cregion_id%7C213&yclid=5458907567149285375 (accessed: 06/01/2026).

11. Bipolar stepper motor PL130H280-D19N [Electronic resource]. — URL: https://purelogic.ru/catalog/dvigatel_shagovyy_bipolyarnyy_pl130h280-d19n/?ysclid=mq6pzqxxvv559225277 (date of issue: 06/01/2026).
12. Planetary precision gearbox 115VRB10K-S32-P0 [Electronic resource]. — URL: https://purelogic.ru/catalog/reduktor_planetarnyy_precizionnyy_115vrb10k-s32-p0/?ysclid=mq6q074rf7140316181 (accessed: 06/01/2026).
13. Single-channel Leadshine DM442 driver [Electronic resource]. — URL: https://cnctechonology.ru/catalog/komplektuyushchie_k_chpu/drayvery_shagovykh_dvigatelay/odnokanalnye_drayvery_shagovykh_dvigatelay/2139 / (date of access: 06/01/2026).
14. Calculation of steps/mm for ballscrews in GRBL, Mach3 and LinuxCNC: formula, examples and calibration [Electronic resource]. — URL: <https://shvp-inner.ru/blog/raschet-steps-mm-dlya-shvp-v-grbl-mach3-i-linuxcnc.html> (date of request: 06/01/2026).
15. Stepper motor principle [Electronic resource]. — URL: <https://inner.su/articles/shagovyy-dvigatel-printsip> / (date of access: 06/01/2026).