

Научная статья  
УДК 629.488.27  
DOI: 10.34759/vst-2023-1-45-53

## ПРОЦЕСС СТЫКОВКИ ОТЪЕМНОЙ ЧАСТИ КРЫЛА И ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТЕНДА

Алексей Евгеньевич Загородний<sup>1</sup> ✉, Сергей Борисович Марьин<sup>2</sup>, Иван Владимирович Лозовский<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре, Россия

<sup>1</sup> aleksey\_yz@mail.ru ✉

<sup>2</sup> maryinsb@mail.ru

<sup>3</sup> Lozovcky@yandex.ru

**Аннотация.** Проанализирован процесс стыковки отъемной части крыла с фюзеляжем пассажирского самолета на основе работы стенда BROTJE. Изложены базовые принципы обеспечения заданной точности стыковки в соответствии с техническими требованиями самолета. Представлены основные этапы стыковки отъемной части крыла и фюзеляжа самолета SSJ-100. Для увеличения программы выпуска самолетов предложено использовать мобильный стыковочный стенд. Приведены основные требования для разработки мобильного стыковочного стенда.

**Ключевые слова:** стыковка агрегатов самолета, автоматизированный стыковочный стенд, отъемная часть крыла, фюзеляж, точность аэродинамических обводов, нивелировочная точка

**Для цитирования:** Загородний А.Е., Марьин С.Б., Лозовский И.В. Процесс стыковки отъемной части крыла и фюзеляжа самолета с применением автоматизированного стенда // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 45–53. DOI: 10.34759/vst-2023-1-45-53

Original article

## DETACHABLE WING PART AND FUSELAGE MATING EMPLOYING AUTOMATED BENCH

Aleksei E. Zagorodnii<sup>1</sup> ✉, Sergei B. Mar'in<sup>2</sup>, Ivan V. Lozovskii<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Komsomolsk-na-Amure State University,  
Komsomolsk-na-Amure, Russia

<sup>1</sup> aleksey\_yz@mail.ru ✉

<sup>2</sup> maryinsb@mail.ru

<sup>3</sup> Lozovcky@yandex.ru

**Abstract.** Airframe units mating is a vital stage of the aircraft final assembly, which should ensure high accuracy of the aircraft external aerodynamic surfaces. As of today, two foreign-made systems of civil aircraft jig-free assembly are being operated in Russia: technological process of detachable wing part and fuselage of the SSJ-100NEW is being realized in Komsomolsk-on-Amur with the BROTJE automated bench, and the German “ThyssenKrupp”

production line is being employed for the MC-21 aircraft in Irkutsk. As for domestic equipment, production line for the Il76MD-90A aircraft automated assembly is functioning in Ulianovsk at the "Aviasatar-SP" aircraft building plant.

In the presented article, the authors consider technological process of detachable wing part to the aircraft fuselage mating employing an automated bench. This contributes to reduction of the number of personnel in charge of the routine technological operations of material production.

Process automation is being implied as the industrial robotics application, much as the numerical control machine tools were employed as the production automation tools. With account for the fact that robotics operate on the assumption of the electronic information, managing programs are being written, products electronic models are being developed and processes are being modeled for it. The article gives an account of the method for the product compliance with design documentation validating, and describes the employed rigging necessary for the bench operation and ensuring high accuracy of measurements. The basic structure of the technological process of the wing detachable part mating with fuselage is presented in the form of the table with the basic operations description. The process of the automated bench with measuring bases is described. The authors propose to employ the considered operation principle of the automated bench while creating a mobile version of the mating bench. The article gives an account of the requirements to the mobile bench structure and its basic technical characteristics.

Application of the automated bench mobile version will allow increasing the volume of released production with the possibility of producing various aircraft configurations at the single production site.

**Keywords:** aircraft assembly units mating, automotive mating bench, outer wing, fuselage, aerodynamic contours precision, datum point

**For citation:** Zagorodnii A.E., Mar'in S.B., Lozovskii I.V. Detachable Wing Part and Fuselage Mating Employing Automated Bench. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 45–53. DOI: 10.34759/vst-2023-1-45-53

## Введение

Одним из ответственных этапов окончательной сборки самолета является процесс стыковки агрегатов, от которого зависит точность геометрических параметров планера, что в свою очередь влияет на целый комплекс аэродинамических характеристик, маневренность, управляемость, аэродинамическое качество.

На сегодняшний день в России эксплуатируются две системы иностранного производства бесстапельной сборки для гражданских самолетов: в г. Комсомольске-на-Амуре реализуется технологический процесс стыковки отъемной части крыла (ОЧК) с фюзеляжем самолета SSJ-100NEW при помощи автоматизированного стенда немецкой фирмы BROTJE и в г. Иркутске для самолёта MC-21 используется немецкая поточная линия «ThyssenKrupp». Из отечественного оборудования функционирует поточная линия автоматизированной сборки самолетов Ил76МД-90А в г. Ульяновске на самолетостроительном заводе «Авиасатар-СП» (АО) [1–3].

Технологический процесс стыковки агрегатов изделия и конструкция стыковочного стенда зависят в основном от принятого технологического членения изделия и процесса сборки. Особенностью процесса стыковки является то, что массивные агрегаты должны быть состыкованы с достаточно

высокой точностью, задаваемой техническими требованиями к аэродинамическим обводам самолета. Вследствие этого процесс стыковки выполняется с применением специальных средств технологического оснащения [4, 6, 7, 8].

## Описание процесса стыковки фюзеляжа и ОЧК

В процессе стыковки агрегаты самолета устанавливаются в линию полета в соответствии с требованиями технической документации. Один из агрегатов является базовым. Сначала выполняется его позиционирование, а затем — процесс стыковки другого агрегата с базовым. Точное позиционирование агрегатов и их соединение по стыковым поверхностям осуществляются с помощью стыковочного стенда и лазерно-оптических средств измерения. При установке агрегатов в требуемое положение применяется операция нивелирования. После установки агрегатов планера самолета в требуемое положение выполняется их соединение по поверхности разъема.

На авиационных предприятиях распространены операции стыковки, выполняющиеся с помощью обычных стыковочных стендов, оборудование которых предполагает установку агрегатов в стыковочное положение вручную, конструкция их состоит из регулируемых ложементов и механизмов подъема, установленных на тележках. Управление

ложементами осуществляется винтовыми механизмами вручную или с помощью гидравлики [1]. Для стыковки агрегатов широкофюзеляжных самолетов применялись стенды на аэростатических опорах [2, 4, 12]. Недостатком подобных устройств является низкая производительность технологического процесса и невысокая объективность контроля взаимного расположения частей и агрегатов самолета.

Все больше при выполнении стыковки частей планера самолета применяются автоматизированные стенды стыковки и лазерные измерительные устройства. В производственном центре ПАО «Корпорация «Иркут» «Региональные самолеты» в г. Комсомольске-на-Амуре реализуется технологический процесс стыковки отъемной части крыла с фюзеляжем самолета SSJ-100 при помощи автоматизированного стенда немецкой фирмы BROTTJE.

Технологический процесс стыковки — это итерационный процесс операций последовательного приближения совпадения сопрягаемых поверхностей агрегатов по линейным и угловым параметрам. При сборке агрегатов для точного позиционирования ОЧК относительно фюзеляжа на поверхности агрегатов в определенных местах наносят нивелировочные точки. Эти точки используются в процессе нивелирования, который заключается в измерении координат заданных точек, определении их превышения по сравнению со значениями, приведенными в технической документации. В зависимости от результата сравнения полученных данных с допускаемыми значениями, выполняются действия по изменению расположения агрегатов самолета друг относительно друга.

В процессе стыковки применяются два лазерных трекера, которые измеряют углы (горизонтальный и вертикальный) и расстояние до центра точки, для его позиционирования в пространстве исполь-

зуется 12 реперных точек. Точность измерения лазерного трекера Leica AT402 составляет  $\pm 15$  мкм. Разрешающая способность 0,1 мкм. Погрешность (MPE — макс. допустимая)  $\pm 10$  мкм. Погрешность по воспроизводимости  $\pm 5$  мкм.

Нивелировочные точки (НТ) выполняют на агрегатах в виде меток (рис. 1), маркируют красными кругами диаметром 20 мм, толщина линии круга равна 3 мм. В глухое отверстие устанавливается адаптер, на который крепится целевой знак, предназначенный для отражения луча лазерного трекера.

НТ, нанесенные на поверхности агрегатов самолета согласно нивелировочной схеме или чертежу, являются технологическими измерительными базами [1].

Для обеспечения заданной точности стыковки агрегатов конструктор задает необходимое число НТ (не менее пяти), которые обеспечивают привязку в процессе стыковки. На фюзеляже самолета предусмотрено шесть точек и пять точек — на ОЧК. Нивелировочные точки фюзеляжа находятся в его нижней части: одна на носовом отсеке, одна на бимсе, четыре на центроплане. НТ ОЧК находятся со стороны нижней панели: три в носовой части, две в хвостовой части.

На рис. 2 представлена схема расположения контрольных точек, при котором обеспечивается прямая видимость установленного рефлектора на НТ для лазерного трекера.

В процессе стыковки, по разности значений фактического положения НТ по оси  $Y$  между точками 1–2 (допустимое отклонение  $\pm 0,7$  мм) и 4–5 (допустимое отклонение  $\pm 1,0$  мм), контролируют крутку консоли крыла (см. рис. 2). По разности значений фактического положения НТ по оси  $Y$  между точками 4–1 и 5–2 контролируется угол поперечного  $V$  крыла (допустимое отклонение

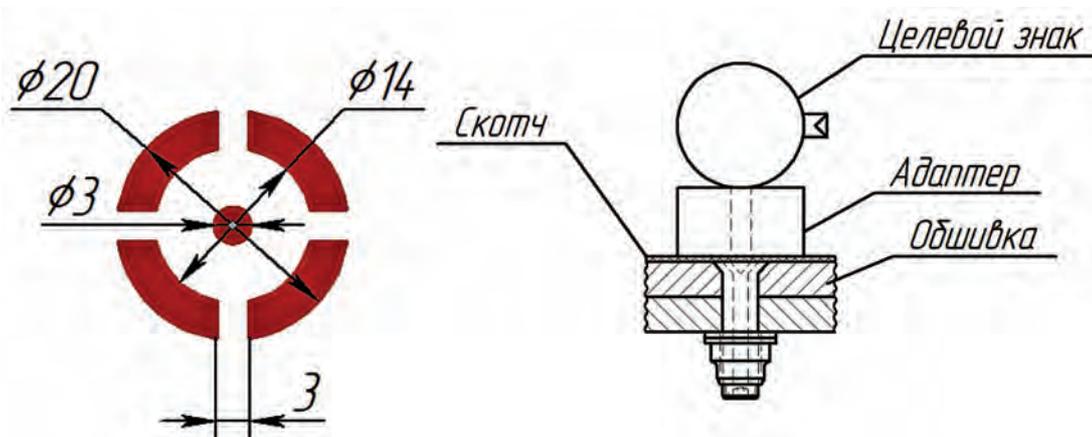


Рис. 1. Типовое обозначение нивелировочной точки на самолете



Рис. 2. Принципиальная схема расположения контрольных точек

$\pm 1,0$  мм). Дополнительно контролируется расстояние между нивелировочной точкой 6 на носовом отсеке фюзеляжа и точкой 4 (допустимое отклонение  $\pm 2,0$  мм) и разность значений между точками 1 и 4 по оси X и Z (допустимое отклонение  $\pm 2,0$  мм и  $\pm 1,5$  мм соответственно). Положение в пространстве точек 1–6 сравнивается с электронным макетом самолёта, затем вычисляются отклонения от теории. В случае отклонений от теории выполняется коррекция положения ОЧК. Точка 3 служит для дополнительного контроля и в процессе стыковки может не применяться [5].

**Описание стыковочного стенда**

Стыковочный стенд состоит из четырех подвижных колонн с позиционерами для фюзеляжа и шести подвижных колонн для ОЧК (по три на каждую).

Управление производится с помощью вычислительной машины стенда, имеющей специальное программное обеспечение (ПО) для стыковки. В ПО есть специальный алгоритм стыковки, предус-

матривающий выполнение нескольких операций. Также имеется возможность запускать программу стыковки с дистанционного пульта управления. Всего применяются два пульта дистанционного управления, по техническим возможностям они позволяют запустить программу стыковки и прервать её [22].

При стыковке фюзеляж остается неподвижным. Во время стыковки перемещаются три колонны, на которых располагается ОЧК. Таким образом ОЧК сводится с центропланом. Фактически расположение НТ отличается от электронной модели, но не должно выходить за пределы допуска, в случае превышения допуска создается запрос на отклонение в конструкторское бюро [2, 4, 16, 19].

Собранный фюзеляж на стенд поступает без отсека Ф6, горизонтального и вертикального оперения. Фюзеляж устанавливается в стенд стыковки на четыре опорные подвижные колонны.

К нижним панелям ОЧК по нервюре №3 крепятся такелажные узлы (рис. 3) с вилками, которые фиксируются с помощью винтов, установленных

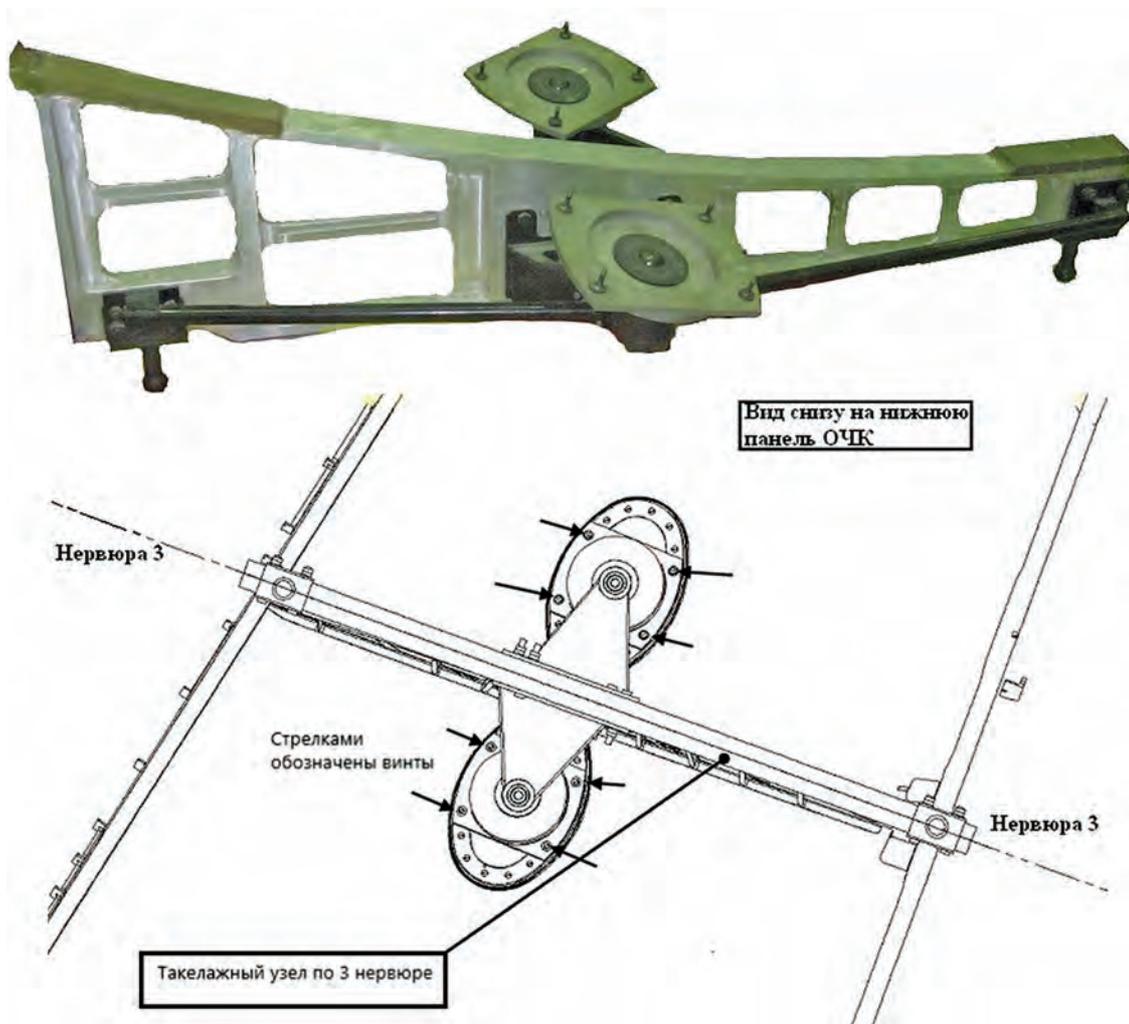


Рис. 3. Такелажные узлы для установки ОЧК в стенд

в крепление нижних люков-лазов нижней панели. Такелажный узел по нервюре №12 (рис. 4) имеет подобную конструкцию, только у него вилка располагается в центральной части. Такая конструкция такелажных узлов позволяет установить ОЧК в стенд на три колонны. Две колонны стенда по нервюре №3 позволяют задать необходимое значение «крутки» консоли, а колонна в зоне нервюры №12 используется для установки поперечного V крыла.

Стыковка происходит следующим образом:

- определяется положение трекеров в пространстве с помощью рефлекторов, установленных на заданных нивелировочных точках;
- определяется положение фюзеляжа в пространстве с помощью нивелировочных точек с дальнейшей установкой в исходное положение стыковки;
- определяется положение ОЧК в пространстве с помощью нивелировочных точек с дальнейшей установкой в исходное положение стыковки;



Рис. 4. Такелажный узел по нервюре № 12

— осуществляется стыковка по программе с помощью подвижных трех колонн, на которых находится ОЧК.

Детализированный технологический процесс стыковки и ОЧК и фюзеляжа представлен в таблице.

**Операции технологического процесса стыковки ОЧК и фюзеляжа**

№	Операция	Описание операции
1	Установка фюзеляжа в стенд BROTJE	Фюзеляж, как базовый, устанавливается в стенд с помощью четырех такелажных узлов (по 2 шт. на борт). Установка производится с использованием мостового крана и траверсы для переустановки фюзеляжа самолета
2	Установка ОЧК в стенд BROTJE	На ОЧК устанавливаются два такелажных узла, затем ОЧК с помощью мостового крана и траверсы для ОЧК устанавливается в стенд
3	Установка рефлекторов на технологические базы	Устанавливаются рефлекторы на технологические базы стенда, ОЧК и фюзеляж
4	Определение положение трекеров в пространстве	Определяется положение трекеров в пространстве для дальнейшей работы с нивелировочными точками фюзеляжа и ОЧК
5	Определение положение фюзеляжа в пространстве и установка в исходное положение стыковки	Определяется положение фюзеляжа в пространстве с помощью нивелировочных точек, затем он устанавливается в исходное положение стыковки
6	Определение положение ОЧК в пространстве и установка в исходное положение стыковки	Определяется положение ОЧК в пространстве с помощью нивелировочных точек, затем она устанавливается в исходное положение стыковки
7	Сведение ОЧК с фюзеляжем	Сведение по заданной программе с помощью подвижных трех колонн, на которых находится ОЧК. Подбор прокладок по стыку ОЧК с фюзеляжем
8	Проверка геометрических параметров линейно-угловыми средствами измерений	Запись протокола замеров. Проверка соответствия с КД полученных фактических значений при нивелировании. Оформление запроса в случае превышения допуска
9	Сверловка отверстий под технологический крепеж	Сверловка происходит по верхним и нижним панелям центроплана фюзеляжа с помощью спец. кондукторов. Сверловка по 1-му и 2-му лонжерону с помощью спец. кондуктора. Сверловка по поясу усиливающему
10	Отведение ОЧК от фюзеляжа	Отведение ОЧК и последующая очистка рабочей зоны от посторонних предметов
11	Обезжиривание, нанесение усилителя адгезии, нанесение герметика на сопрягаемые поверхности ОЧК и фюзеляжа	Обезжириваются сопрягаемые поверхности ОЧК и центроплана фюзеляжа, наносится усилитель адгезии. Наносится герметик внутрিশовный на поверхности ОЧК и центроплана. Обезжириваются пояс усиливающий и поверхность фюзеляжа, наносится усилитель адгезии на сопрягаемые поверхности. По окончании сушки усилителя адгезии наносится герметик на пояс усиливающий
12	Сведение ОЧК с фюзеляжем на герметике и установка технологического крепежа	По программе стенда происходит сведение ОЧК с центропланом фюзеляжа на герметике. Устанавливается технологический крепеж по верхним и нижним панелям от центральной части ОЧК к носовой и хвостовой части с определённым моментом затяжки. Параллельно установке технологического крепежа по верхним и нижним панелям устанавливается усиливающий пояс на технологический крепеж. Устанавливается технологический крепеж по 1-му и 2-му лонжерону. Контролируется время отверждения герметика перед разделкой отверстий 1-й очереди. Данные заносятся в листы журнала герметизации
13	Развертывание и раскатка отверстий первой очереди	Развертывание отверстий 1-й очереди по всем стыковочным поверхностям ОЧК с фюзеляжем. Раскатка отверстий по нижним панелям центроплана 1-й очереди. Перед раскаткой отверстий по нижним панелям контролируется диаметр отверстий и заносится в паспорт технологический. После раскатки контролируется диаметр раскатанных отверстий нутромером и проверяется приращение диаметра не менее 0,015 мм. Разделанные отверстия по верхним панелям, 1-му и 2-му лонжерону контролируются калибрами
14	Установка крепежа первой очереди	Устанавливается крепеж на герметике. Крепеж устанавливается с моментом затяжки, соответствующим КД
15	Развертывание и раскатка отверстий второй очереди	Развертывание отверстий 2-й очереди по всем стыковочным поверхностям ОЧК с фюзеляжем. Раскатка отверстий по нижним панелям центроплана 2-й очереди. Перед раскаткой отверстий по нижним панелям контролируется диаметр отверстий и заносится в паспорт технологический. После раскатки контролируется диаметр раскатанных отверстий нутромером и проверяется приращение диаметра не менее 0,015 мм. Разделанные отверстия по верхним панелям, 1-му и 2-му лонжерону контролируются калибрами

Окончание таблицы

№	Операция	Описание операции
16	Установка крепежа второй очереди	Устанавливается крепеж на герметике. Крепеж устанавливается с моментом затяжки, соответствующим КД
17	Установка крепежа первой очереди по поясу усиливающему	Расверливаются отверстия под заклепки по поясу усиливающему, снимаются фаски по кромкам выполненных отверстий. Устанавливаются заклепки на грунтовке в соответствии с КД, и производится клепка по поясу усиливающему. Разделяются отверстия под болтовое соединение по поясу усиливающему 1-й очереди. Производится проверка выполненных отверстий калибрами. Устанавливается крепеж на герметике 1-й очереди с моментом затяжки, соответствующим КД
18	Установка крепежа второй очереди по поясу усиливающему	Разделяются отверстия под болтовое соединение по поясу усиливающему 2-й очереди. Производится проверка выполненных отверстий калибрами. Устанавливается крепеж на герметике 2-й очереди с моментом затяжки, соответствующим КД

### Предложение по увеличению производительности

В настоящее время, при выполнении заданной программы выпуска самолетов, работы на стыковочном стенде ведутся в течение двух рабочих смен.

При увеличении программы выпуска в 1,5 раза ее выполнение можно обеспечить при трехсменном режиме работы.

При дальнейшем увеличении программы выпуска самолетов, с учетом того, что резервов снижения времени стыковочных работ за счет переноса некоторых операций на участки, не связанные с работой стенда, уже нет, необходимо применение еще одного стыковочного стенда. Это требует создания еще одного технологического участка, что невозможно из-за ограничений по площади цеха. Поэтому решением данной проблемы может быть применение мобильного стыковочного стенда, который бы позволил без привлечения дополнительной площади выполнить работы по стыковке фюзеляжа и ОЧК в случае увеличения программы выпуска самолетов.

Рассмотренный принцип работы можно использовать при создании мобильной версии стыковочного стенда. Однако данный стенд будет сборный и должен будет иметь массивную силовую конструкцию в виде рамы либо иметь несколько сборных подвижных платформ, которые могут передвигаться друг относительно друга. Грузоподъемность платформы под ОЧК должна быть не менее 4000 кг, платформы под фюзеляж — не менее 12 000 кг. На каждой платформе должно быть не менее трех НТ (для повышения точности измерения пять и более) с заранее известными координатами, что позволит сориентировать трекер в пространстве. Важным условием является то,

что платформа, по которой ориентируется трекер, будет неподвижна относительно трекера либо трекер будет устанавливаться непосредственно на платформу и жестко фиксироваться. Данная схема работы позволит за счет средств линейно-угловых измерений состыковать ОЧК с фюзеляжем с точностью, соответствующей КД [17–20].

Конструкция стенда должна иметь достаточную жесткость (прогиб балки рамы платформы не более 0,01 мм и т.д.), обеспечивать удобные подходы в рабочие зоны. Удобные подходы позволят в дальнейшем всю разделку отверстий по нижним панелям центроплана выполнять робототехнике, что существенно сократит количество ручных операций [9–15].

Отдельные части конструкции стенда должны быть изготовлены с высокой точностью. Стенд должен иметь ряд конструктивных решений, позволяющих адаптировать его под конкретный тип воздушного судна.

Проблему обеспечения точности стыковки без отклонений от КД позволит решить ужесточение допусков в зоне сопряжения ОЧК и центроплана. Линейно-измерительные средства позволяют лишь выявить отклонение фактической модели от теоретической [20, 21, 23, 24].

### Выводы

Использование мобильного стенда в технологии стыковки ОЧК с фюзеляжем значительно расширит возможности производства, а также позволит без дополнительного увеличения производственной площади увеличить объем продукции с возможностью выпуска разных по конфигурации воздушных судов на одном производственном участке, что делает в настоящее время использование мобильного стенда перспективным.

## Список источников

1. Братухин А.Г. (науч. ред.) Приоритеты авиационных технологий: В 2 кн. — М.: Изд-во МАИ, 2004. Кн. 1. Гл. 1–12. С. 294–295.
2. Qi R., Tang Y., Zhang K. Accuracy Improvement Calibrations for the Double-Position 4-PPPS Aircraft Docking System // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. No. 4, pp. 1–14. DOI: 10.1155/2020/4358901
3. Mosqueira G., Apetz J., Santos K. et al. Analysis of the indoor GPS system as feedback for the robotic alignment of fuselages using laser radar measurements as comparison // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2012. Vol. 28. No. 6, pp. 700–709. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.03.004
4. Крысин В.Н. Технологическая подготовка авиационного производства. — М.: Машиностроение, 1984. С. 162–167.
5. Гусева Р.И., Марьин С.Б. Проектирование и монтаж сборочных приспособлений: Учеб. пособие. — Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КНАГУ, 2022. — 99 с.
6. Молчанов И.В., Гусева Р.И. Особенности конструкции стыковочного стенда хвостовой части фюзеляжа самолета истребителя // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Сборник трудов IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (12–16 апреля 2021). — Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КНАГУ, 2021. С. 286–288.
7. Гусева Р.И. К вопросу расчета точности сборки узлов и агрегатов планера самолета // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2011. №1–1(5). С. 16–22.
8. Феоктистов С.И., Марьин С.Б., Макарова Е.А. Современные методы и средства автоматизации контроля оснастки и изделий в самолетостроении: Учебное пособие для вузов. — Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КНАГУ, 2003. — 78 с.
9. Зайцев Г.Н. Управление качеством в процессе производства: Учебное пособие. — М.: РИОР: ИНФРА, 2016. — 164 с. URL: <https://znanium.com/read?id=259578>
10. Ковалев А.А., Рогов Н.В. Оценка рассеяния значений показателя качества в зависимости от параметров технологического процесса // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 175–186. DOI: 10.34759/vst-2021-1-175-186
11. Загородний А.Е., Марьин С.Б. Технология выполнения отверстий под высокоресурсные соединения при стыковке отъемной части крыла с фюзеляжем самолета // Аэрокосмическая декада: сборник XV Всероссийской студенческой научной школы (3–8 октября 2022; Ярополец, МО, МАИ). М.: Перо, 2022. С. 90–95.
12. Cheng L., Wang Q., Li J., Ke Y. Variation modeling for fuselage structures in large aircraft digital assembly // *Assembly Automation*. 2015. Vol. 35. No. 2, pp. 172–182. DOI: 10.1108/AA-07-2014-069
13. Wang C., Wang W. Development of Control System of Aircraft Fuselage Docking Based on PLC // 3<sup>rd</sup> International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics (AMME 2019). Vol. 2073. No. 1. DOI: 10.1063/1.5090678
14. Drouot A., Zhao R., Irving L. et al. Measurement Assisted Assembly for High Accuracy Aerospace Manufacturing // 16<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2018). Vol. 5. No. 11, pp. 393–398.
15. Кривцов В.С., Павленко В.Н., Воронько В.В., Воробьев Ю.А., Шостак И.В. Комплексный подход к роботизации сборочных процессов в самолетостроении на основе нечеткой логики // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 32–39.
16. Qu L., Dong Z., Zhou H. Study on the Measurement Assisted Assembly Technology of Aircraft Flexible Assembly Tool // IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (29–30 December 2014; Shenyang, Liaoning, China), pp. 66–69.
17. Mei Z., Maropoulos P.G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing // *Journal of Engineering Manufacture*. 2014. Vol. 228. No. 10, pp. 1185–1197. DOI: 10.1177/0954405413517387
18. Zhu W., Zhang A., Mei B., Ke Y. Automatic stepping for circumferential splice drilling in aircraft fuselage assembly // *Industrial Robot*. 2016. Vol. 43. No. 2, pp. 144–152. DOI: 10.1108/IR-06-2015-0114
19. Conte J., Santolaria J., Majarena A.C. et al. Laser Tracker error modeling and kinematic calibration strategy // *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 615, pp. 63–69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.615.63
20. Li S., Huang Z., Zeng Q., Huang X. Study of a transferring system for measurements in aircraft assembly // *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*. 2022. Vol. 3. No. 1, pp. 31–47. DOI: 10.1108/JIMSE-01-2022-0001
21. Zhu Y., Huang X., Fang W., Li S. Trajectory Planning Algorithm Based on Quaternion for 6-DOF Aircraft Wing Automatic Position and Pose Adjustment Method // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2010. Vol. 23. No. 6, pp. 707–714. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60273-9
22. Миллюков И.А., Роголев А.Н., Соколов В.П. Подходы к интеграции конструирования и технологического проектирования // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 59–70. DOI: 10.34759/vst-2020-4-59-70
23. Sun W., Wei Z., Cao L. A Triple-laser Trackers Automatic Measurement System for Large-scale Parts Assembly // 9<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement & Instruments (16–18 August 2009; Beijing, China). Vol. 2, pp. 540–543. DOI: 10.1109/ICEMI.2009.5274530
24. Li Y., Zhang L., Wang Y. An optimal method of posture adjustment in aircraft fuselage joining assembly with engineering constraints // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2017. Vol. 30. No. 6, pp. 2016–2023. DOI: 10.1016/j.cja.2017.05.006

## References

1. Bratukhin A.G. (scientific ed.) *Prioritety aviatsionnykh tekhnologii. V 2 kn.* (Priorities in aviation technologies. In 2 books). Moscow, MAI, 2004. Book 1. Chapters 1–12, pp. 294–295.
2. Qi R., Tang Y., Zhang K. Accuracy Improvement Calibrations for the Double-Position 4-PPPS Aircraft Docking System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, no. 4, pp. 1–14. DOI: 10.1155/2020/4358901
3. Mosqueira G., Apetz J., Santos K. et al. Analysis of the indoor GPS system as feedback for the robotic align-

- ment of fuselages using laser radar measurements as comparison. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, vol. 28, no. 6, pp. 700–709. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.03.004
4. Krysin V.N. *Tekhnologicheskaya podgotovka aviatsionnogo proizvodstva* (Technological preparation of aviation production), Moscow, Mashinostroenie, 1984, pp. 162–167.
  5. Guseva R.I., Mar'in S.B. *Proektirovanie i montazh sborochnykh prispособlenii* (Design and installation of assembly devices), Komsomol'sk-na-Amure, KnAGU, 2022, 99 p.
  6. Molchanov I.V., Guseva R.I. *Materialy IV Vserossiiskoi natsional'noi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy" (12–16 April 2021; Komsomol'sk-na-Amure)*, pp. 286–288.
  7. Guseva R.I. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 1–1(5), pp. 16–22.
  8. Feoktistov S.I., Mar'in S.B., Makarova E.A. *Sovremennye metody i sredstva avtomatizatsii kontrolya osnastki i izdelii v samoletostroenii* (Modern automation methods and means for equipment and products control in aircraft building), Komsomol'sk-na-Amure, KnAGTU, 2003, 78 p.
  9. Zaitsev G.N. *Upravlenie kachestvom v protsesse proizvodstva* (Quality management in the production process), Moscow, RIOR: INFRA, 2016, 164 p. URL: <https://znanium.com/read?id=259578>
  10. Kovalev A.A., Rogov N.V. Evaluation of quality indicator dispersion depending on technological process parameters. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 175–186. DOI: 10.34759/vst-2021-1-175-186
  11. Zagorodnii A.E., Mar'in S.B. *Materialy XV Vserossiiskoi studencheskoi nauchnoi shkoly "Aerokosmicheskaya dekada" (3–8 October 2022; Yaropolets, MO, MAI)*, Moscow, Pero, 2022, pp. 90–95.
  12. Cheng L., Wang Q., Li J., Ke Y. Variation modeling for fuselage structures in large aircraft digital assembly. *Assembly Automation*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 172–182. DOI: 10.1108/AA-07-2014-069
  13. Wang C., Wang W. Development of Control System of Aircraft Fuselage Docking Based on PLC. *3<sup>rd</sup> International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics (AMME 2019)*. Vol. 2073, no. 1. DOI: 10.1063/1.5090678
  14. Drouot A., Zhao R., Irving L. et al. Measurement Assisted Assembly for High Accuracy Aerospace Manufacturing. *16<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2018)*. Vol. 5, no. 11, pp. 393–398.
  15. Krivtsov V.S., Pavlenko V.N., Voronko V.V., Vorobjev Y.A., Shostak I.V. Complex approach to robotic automation of assembly processes in aircraft manufacturing based on fuzzy logic. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 32–39.
  16. Qu L., Dong Z., Zhou H. Study on the Measurement Adied Assembly Technology of Aircraft Flexible Assembly Tool. *IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (29–30 December 2014; Shenyang, Liaoning, China)*, pp. 66–69.
  17. Mei Z., Maropoulos P.G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing. *Journal of Engineering Manufacture*, 2014, vol. 228, no. 10, pp. 1185–1197. DOI: 10.1177/0954405413517387
  18. Zhu W., Zhang A., Mei B., Ke Y. Automatic stepping for circumferential splice drilling in aircraft fuselage assembly. *Industrial Robot*, 2016, vol. 43, no. 2, pp. 144–152. DOI: 10.1108/IR-06-2015-0114
  19. Conte J., Santolaria J., Majarena A.C. et al. Laser Tracker error modeling and kinematic calibration strategy. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 615, pp. 63–69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.615.63
  20. Li S., Huang Z., Zeng Q., Huang X. Study of a transferring system for measurements in aircraft assembly. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 31–47. DOI: 10.1108/JIMSE-01-2022-0001
  21. Zhu Y., Huang X., Fang W., Li S. Trajectory Planning Algorithm Based on Quaternion for 6-DOF Aircraft Wing Automatic Position and Pose Adjustment Method. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, vol. 23, no. 6, pp. 707–714. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60273-9
  22. Milyukov I.A., Rogalev A.N., Sokolov V.P. Approaches to design engineering and technological designing integration. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 59–70. DOI: 10.34759/vst-2020-4-59-70
  23. Sun W., Wei Z., Cao L. A Triple-laser Trackers Automatic Measurement System for Large-scale Parts Assembly. *9<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement & Instruments (16–18 August 2009; Beijing, China)*, vol. 2, pp. 540–543. DOI: 10.1109/ICEMI.2009.5274530
  24. Li Y., Zhang L., Wang Y. An optimal method of posture adjustment in aircraft fuselage joining assembly with engineering constraints. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, vol. 30, no. 6, pp. 2016–2023. DOI: 10.1016/j.cja.2017.05.006

Статья поступила в редакцию 24.11.2022; одобрена после рецензирования 29.11.2022; принята к публикации 02.12.2022.

The article was submitted on 24.11.2022; approved after reviewing on 29.11.2022; accepted for publication on 02.12.2022.